

单线铁路隧道穿越断层破碎带施工风险研究

曹晓航¹, 刘铁成², 于长一¹

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司; 2. 中交一航局第三工程有限公司)

摘要: 云贵地区受地壳板块构造影响, 隧道围岩稳定性差, 为解决软岩隧道大变形的问题, 以玉磨铁路的控制性工程景寨隧道为背景, 采用离散元法建立隧道穿越软弱破碎带模型, 模拟了单线铁路隧道施工掘进中围压的变形情况, 结果表明, 当采用台阶法开挖时, 二台阶和三台阶交界处的位移最大, 需要采用注浆、加强支护等措施, 控制挤压大变形。可为铁路隧道穿越断层破碎带施工提供借鉴。

关键词: 断层破碎带; 软岩隧道; 离散元; 台阶法

0 引言

近几年我国铁路隧道建设发展迅猛, 长深埋隧道工程越来越多, 然而高地应力区软岩的大变形问题一直困扰着铁路隧道施工建设与运营。尤其在穿越断层地区, 由于构造应力发达而复杂, 初始地应力较大, 围岩完整性与强度较低, 引起的软岩大变形造成初期支护结构严重变形, 混凝土开裂、凸起, 钢架扭曲, 支护体系被破坏, 对隧道工程施工建设安全与进度、运营管理带来很大威胁。因此, 研究穿越断层破碎带隧道围岩变形特征对于隧道安全高效施工具有重要意义。

目前隧道穿越断层破碎带研究有诸多成果。刘高等^[1]采用3DEC软件模拟了木寨岭隧道实际工程的开挖与支护过程, 分析了对围岩稳定性的影响。孙均等^[2]指出考虑围岩的流变特性是必要的。王树仁^[3]首先分析了乌鞘岭隧道工程地质条件, 对隧道围岩产生的大变形力学机制进行了研究, 提出了一种刚隙柔层支护技术。丁远振等^[4]分析了断层带影响下的高应力软岩隧道变形特征及支护结构破坏机理, 并提出了一种支护措施。郭小龙等^[5]的数值模拟研究指出高地应力区软岩隧道开挖后围岩按照层面剪切—层面拉伸—岩石剪切的顺序发生塑性破坏。马栋等^[6]论述了大变形隧道变形特征和关键控制技术。Bian K 等^[7]结合力学和地质分析, 得到了黄家寨隧道发生大变形的2个主要原因。Lai J 等^[8]对秦岭—巴山强构造应力区域的某隧道进行了分析, 提出了一种综合支护方法。

为研究穿越断层破碎带隧道围岩变形特征, 本文以玉磨铁路景寨隧道工程项目及其工程地质

条件为背景, 探究高地应力区软岩隧道在施工建设过程中的大变形规律及其控制措施, 为隧道安全高效施工提供重要的技术支持。

1 工程概况

景寨隧道全长 9 509 m, 最大埋深 711 m, 是中老昆万铁路全线控制性工程。隧道地表水、地下水较发育, 在原工程施工方案中, 隧道采用新奥法、三台阶开挖。景寨隧道地质条件差, 施工条件恶劣, 共计发生 12 次突涌事件, 最大突涌超过 2 500 m³。

景寨隧道断层区域围岩十分破碎, 节理裂隙发育, 岩性及地质构造均对隧道围岩存在较大影响。同时断层破碎带宽度约 20 m, 碎裂蚀变强烈, 菱形构造体、揉皱、岩脉、擦痕发育, 该断层大角度斜交线路, 使施工避无可避。该区地表水主要为山上自然沟水, 由大气降水补给。地下水类型以第四系孔隙潜水、基岩裂隙水、岩溶水为主。该地区为热带气候, 降水主要集中在 5—9 月, 且多以大雨、暴雨的形式出现。隧道区构造发育、断层及褶皱发育, 岩体受其影响而破碎, 且该地带易富水, 为隧道涌突水的危险地带。由于上述不良工程地质条件, 在工程实施过程中容易出现超挖及超前支护失效等现象。

基于隧道大变形段围岩优势节理角度明显的地质特点, 为了真实地模拟该特殊围岩特征, 本文采用三维离散元数值软件 3DEC 进行数值模拟。

2 数值模型

在三维离散元数值软件 3DEC 中建立数值计算模型, 计算模型的岩体初始应力场仅考虑其自

重应力场。本文模型隧道埋深取 500 m, 计算中围岩及节理分别采用弹塑性本构模型、库伦滑移

本构模型, 同时施加相应的位移边界条件, 隧道计算模型如图1所示。

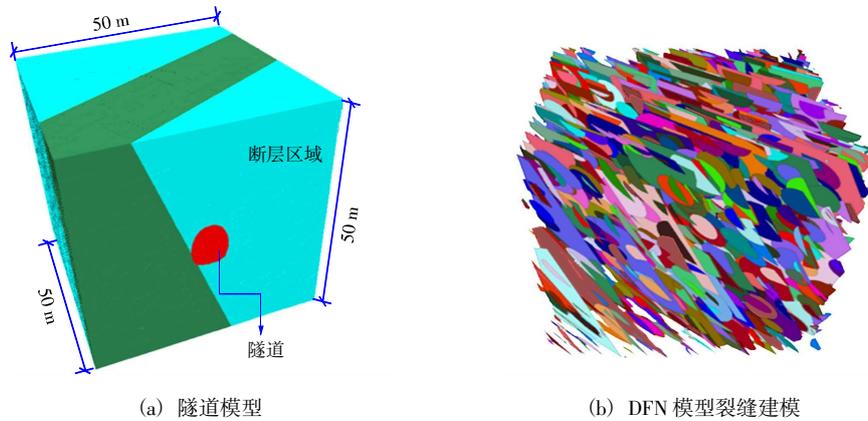


图1 隧道数值计算模型

隧道施工受到围岩岩性和隧道围岩结构面的影响, 目前试验室中难以得到准确的结构面信息, 可采用数值反演结构面参数。岩石结构面主要分级方法有 RMR, RQD, RMI 和 GSI。这些方法采用较多的是 Hoek E 等^[9-10]提出的 GSI 方法, 根据式(1)~式(5)进行围岩强度参数计算。

$$\frac{E_{rm}}{E_i} = (0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{(60+15D-GSI)/11}}) \quad (1)$$

$$\sigma_{c, mass} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - \alpha(m_b - 8s))}{2(1 + \alpha)(2 + \alpha)} (\frac{m_b}{4 + s})^{\alpha - 1} \quad (2)$$

$$m_b = m_i \exp(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}) \quad (3)$$

$$s = \exp(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}) \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}) \quad (5)$$

式中: E_{rm} 为岩体弹性模量, GPa; $\sigma_{c, mass}$ 为岩体单轴抗压强度, MPa; GSI 为地质强度指数; E_i 为岩石的变形模量, GPa; σ_{ci} 为完整岩石的单轴抗压强

度, MPa; D 为岩体损伤系数, 取 0.5; α 为与地质强度指标 GSI 有关的参数; m_b 为岩石的坚硬程度; s 为岩石的破坏程度; m_i 为反映不同岩石类型的参数。

根据文献[11]中岩体节理几何参数布置方法, 首先设置节理为均匀分布, 特征单元 $\Delta z_{min} = 0.8$ 。

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (6)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (7)$$

$$K_n = 10 \left[\frac{K + \frac{3}{4}G}{\Delta z_{min}} \right] \quad (8)$$

$$K_s = 0.4K_n \quad (9)$$

式中: K 为体积模量, GPa; G 为剪切模量, GPa; E 为弹性模量, GPa; μ 为泊松比; K_n 为接触面法向刚度, GPa; K_s 为接触面切向刚度, GPa。

按照 GSI 岩石分类利用式(1)~式(9), 结合数值反演分析, 得到表 1 及表 2 中的围岩参数。

表1 板岩岩体强度参数表

| 岩性 | 岩石参数 | | GSI | 材料参数 | | | | 岩体参数 | |
|--------|--------------------|------------|-----|-------|-------|-----------|----------|-------------------------|---------------|
| | σ_{ci} /MPa | E_i /GPa | | m_i | m_b | s | α | $\sigma_{c, mass}$ /MPa | E_{rm} /GPa |
| 天然炭质板岩 | 28.9 | 7.6 | 41 | 19 | 1.081 | 0.000 345 | 0.531 | 7.5 | 0.59 |
| 饱和炭质板岩 | 12.1 | 2.8 | 37 | 6 | 0.249 | 0.000 235 | 0.524 | 4.0 | 0.11 |

表2 炭质板岩力学参数表

| 岩性 | 岩体参数 | | | | | | 结构面参数 | | | | |
|--------|--------------------------|----------|----------|------------|-------------|--------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------|
| | 密度/($kg \cdot m^{-3}$) | K /GPa | G /GPa | C_b /MPa | φ_b | σ_{it} /MPa | K_n /GPa | K_s /GPa | C_j /MPa | φ_j | σ_{jt} /MPa |
| 天然炭质板岩 | 2 490 | 0.45 | 0.249 | 1.74 | 22.5 | 0.65 | 31.01 | 12.18 | 3.65 | 29.1 | 3.55 |
| 饱和炭质板岩 | 2 510 | 0.23 | 0.091 | 0.93 | 20.1 | 0.32 | 11.07 | 4.35 | 2.81 | 20.3 | 1.56 |

3 结果分析

由表1和表2中的参数计算结果得到了隧道掌子面在断裂破碎带中进入10 m、20 m、30 m、40 m、50 m的变形情况。

隧道掌子面位于断层破碎带中10 m时，如图2所示，隧道掌子面左侧首先进入断层破碎带中。隧道掌子面左右两侧的围岩位移均较大，其中掌子面左侧围岩的位移明显大于右侧围岩位移。最大位移发生在隧道的拱腰附近，位移量为50 cm，而相应的右侧位置最大位移约30 cm。

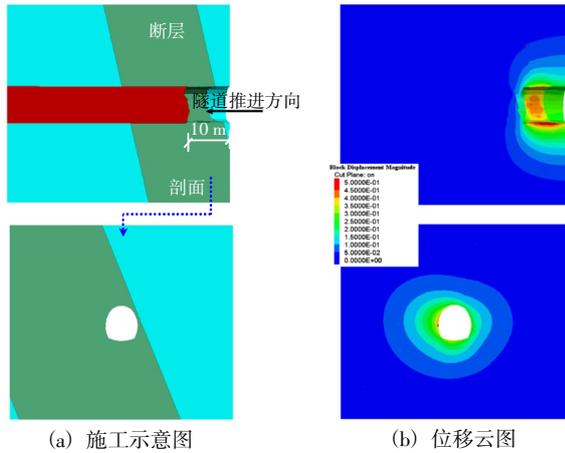


图2 隧道进入断层范围10 m

当隧道掌子面位于断裂破碎带中20 m时，如图3所示，此时隧道整个掌子面已全部进入断层破碎带。在断层区域内，隧道掌子面两侧围岩的位移均较大，基本为对称变形，此时隧道变形主要受围岩岩性影响，结构面导致的差异变形较小。最大位移发生在掌子面左侧的拱腰附近。

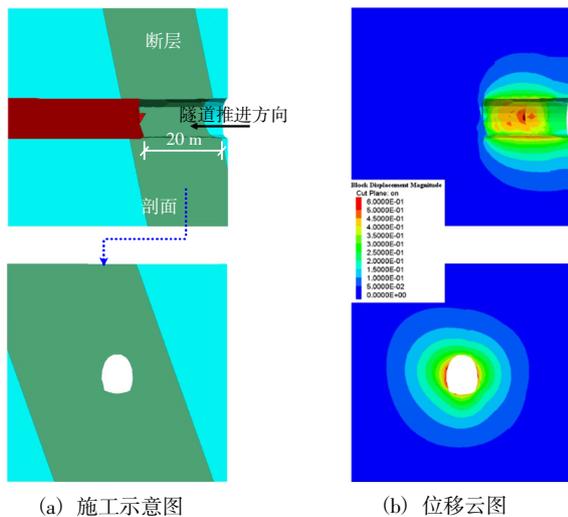


图3 隧道进入断层范围20 m

隧道子面位于断层破碎带中30 m时，如图4

所示。隧道掌子面附近的围岩变形较大，较对称，受结构面影响更小。最大位移位于拱腰附近，拱底变形也增加。

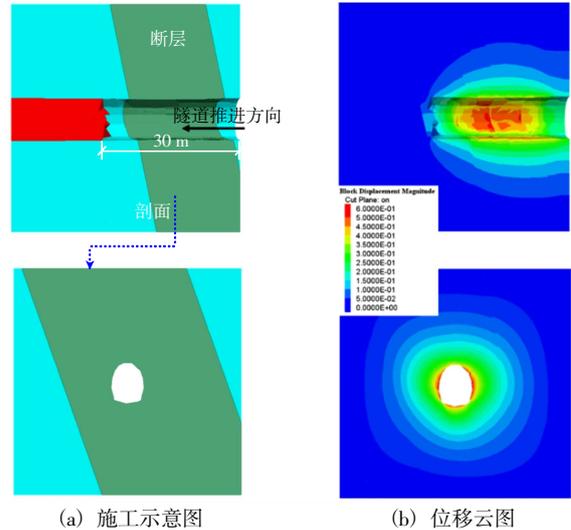


图4 隧道自断层向前推进30 m

当隧道掌子面位于断层破碎带中40 m时，如图5所示。隧道掌子面即将穿越断层破碎带区域，隧道掌子面右侧围岩的位移较大，左侧位移较小，此时结构面影响围岩不均匀变形。最大位移位于掌子面右侧拱腰附近，最大变形量约60 cm。

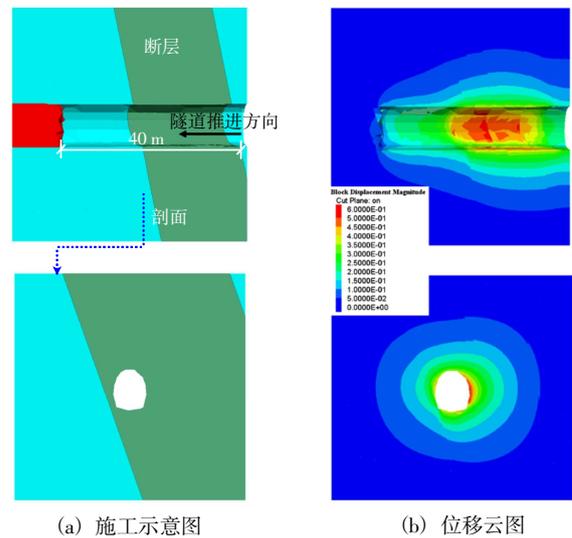


图5 隧道自断层向前推进40 m

当隧道掌子面位于断层破碎带中50 m时，如图6所示，即掌子面部分穿过断层破碎带，部分位于断层破碎带内。受岩性和断层影响，断层区域内的围岩变形明显大于非断层区域的变形，非断层区域围岩最大变形值约33 cm，断层区域内围岩变形最大值约60 cm。

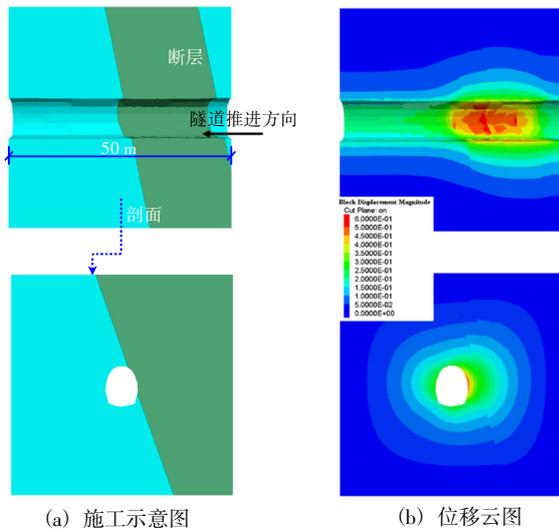


图6 隧道自断层向前推进 50 m

4 软岩隧道支护控制对策

由模拟结果可知,隧道穿越断层破碎带时,大变形、不均匀变形是施工需要着重考虑的问题,其支护结构形式和支护位置比常规隧道支护更复杂,要求更高。

针对景寨隧道模拟结果和现场软岩大变形施工情况,提出6点控制变形措施:

1) 短台阶快速成环施工方法:设计预判围岩为I级及以下的软岩大变形段落需要采用快速成环施工工法,多层支护,支护时机需要根据位移变化情况判定。

2) 调整开挖轮廓与钢架曲率:超前钻孔预判为I级软岩大变形时,调整掌子面开挖轮廓线,尽可能采用类圆形开挖断面,以增强初支的支护效果。

3) 补偿注浆:支护支撑完成后,采用补偿注浆的方式填充围岩变形形成的孔隙,增强围岩的整体性,提高围岩的自稳能力。

4) 非对称支护:穿越断层破碎带时,根据断层节理走向,在拱腰附近加强破碎带一侧的注浆和索脚锚杆,降低初支的不均匀变形导致的片帮和超欠挖。

5) 多层支护:根据超前预报和监控量测数据,当判定为软岩大变形I级时,需要采用分次多层支护的方式加强初支,地应力较大时,应尽可能采用超前导洞释放部分地应力降低初支的受力变形。

6) 高预应力锚索:当研判为软岩大变形III级段落,需要结合高预应力锚索进行控制变形,

但需要尽早实施,避免因为松动圈过大,降低了锚索效果。

5 结语

本文以玉磨铁路景寨软岩大变形隧道为研究对象,建立了数值分析模型,研究了铁路隧道穿越断层破碎带施工风险,结合现场施工,为隧道穿越断层破碎带施工提供了建议,结论如下:

隧道穿越断层破碎带时,掌子面附近的围岩变形受围岩性质和结构面综合影响,在初入和即将出断层破碎带时,掌子面靠近破碎带一侧变形较大,即初期支护的不均匀变形也较大,需要采用非对称的支护方式控制初期支护不均匀变形导致的片帮和超欠挖。最大的变形位置为靠近断层破碎带一侧的拱腰位置。

当隧道完全进入断层破碎带时,其整体变形均匀,但受岩性影响,导致整体变形较大,需要根据变形情况,适当采用加强初期支护强度、调整掌子面开挖轮廓、增加钢架曲率、补偿注浆增加围岩自稳性等措施来控制软岩大变形导致的初期支护失效。在单线铁路施工作业面较小、围岩较差时,施工尽可能采用短台阶法施工,做到早成环。

参考文献:

- [1] 刘高,张帆宇,李新召,等.木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J].岩石力学与工程学报,2005(S2):5521-5526.
- [2] 孙钧.岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J].岩石力学与工程学报,2007(6):1081-1106.
- [3] 王树仁,刘招伟,屈晓红,等.软岩隧道大变形力学机制与刚隙柔层支护技术[J].中国公路学报,2009,22(6):90-95.
- [4] 丁远振,谭忠盛,马栋.高地应力断层带软岩隧道变形特征与控制措施研究[J].土木工程学报,2017,50(S1):129-134.
- [5] 郭小龙,谭忠盛,李磊,等.高地应力陡倾层状软岩隧道变形破坏机理分析[J].土木工程学报,2017,50(S2):38-44.
- [6] 马栋,孙毅,王武现,等.高地应力软岩隧道大变形控制关键技术[J].隧道建设(中英文),2021,41(10):1634-1643.
- [7] BIAN K, LIU J, LIU Z, et al. Mechanisms of large deformation in soft rock tunnels: a case study of Huangjiazhai tunnel[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 78(4): 1-14.
- [8] LAI J, WANG X, QIU J, et al. Extreme deformation characteristics and countermeasures for a tunnel in difficult grounds in southern Shaanxi, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(19).
- [9] HOEK, E, DIEDERICHS, M S. Empirical estimation of rock mass modulus[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2006, 43, 203-215.
- [10] HOEK, E, Carranza-Torres, C, Curkum, B. Hoek-Brown failure criterion—2002 Edition[C]//NARMS-TAC Conference Canada, 2002:267-273.
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. 3DEC User Manual[Z]. 2016.