

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 2-0455-09

浅埋破碎地层隧道施工方法研究

乔春江^{1,2}, 陈卫忠^{1,3}, 王 辉¹, 田洪铭¹, 谭贤君¹

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056;
3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 西藏扎墨公路嘎隆拉隧道所处地域地质条件复杂, 受地质构造的影响, 隧道口地层节理裂隙特别发育、岩石强度低, 围岩自稳能力差, 给隧道的施工安全带来很大影响。通过数值仿真研究破碎地层采用全断面、台阶法和 CD 法施工时围岩和支护结构稳定性, 提出适合嘎隆拉隧道破碎围岩地层特点的三台阶开挖法。在此基础上, 运用三维数值仿真计算嘎隆拉隧道三台阶法开挖过程中的围岩稳定性, 研究隧道开挖时围岩和衬砌的受力变形情况。研究成果为该隧道施工和同类工程建设提供了理论依据和实践经验。

关 键 词: 嘎隆拉隧道; 破碎围岩; 数值仿真; 施工方法

中图分类号: U452.2

文献标识码: A

Study of construction method of tunnel in shallow broken rock mass

QIAO Chun-jiang^{1,2}, CHEN Wei-zhong^{1,3}, WANG Hui¹, TIAN Hong-ming¹, TAN Xian-jun¹

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. Second Highway Consultants Co., Ltd. of China Communications Construction Corporation, Wuhan 430056, China;
3. Geotechnical & Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The Galongla tunnel of Zhamo Highway in Tibet was constructed under complex geological conditions and influenced by geological structure. Joint and cracks of stratum in the tunnel portal are developed extremely. The main characteristics of surrounding rock are low strength and bad self-stability which have great influence on the safety of tunnel construction. Through numerical simulation, the stability of surrounding rock and supporting structure is studied by using whole section method, bench method and CD method to excavate in broken stratum. The three-bench method appropriating for broken rock mass characteristic of Galongla tunnel is proposed. On this basis, the stability of surrounding rock during excavation process using three-bench method is studied by 3D numerical simulation; and the stress and deformation condition of surrounding rock and lining during excavation process are also researched. The results provide a theoretical basis and practical experience for this tunnel and similar engineering construction.

Key words: Galongla tunnel; broken rock mass; numerical simulation; construction method

1 引 言

随着我国经济建设的蓬勃发展及西部大开发政策的进一步落实, 对于交通基础设施建设的需求日益增加, 尤其是对铁路、公路等陆路交通网建设的需求。因此, 将有大量隧道在高海拔、严寒等恶劣条件下修建。目前我国已建或建成的高海拔隧道有大坂山隧道^[1] (海拔 3 792 m)、风火山隧道^[2] (海拔 4 900 m)、昆仑山隧道^[3] (海拔 4 648 m)、羊八井隧道^[4] (海拔 4 264 m)、祁连山隧道^[5] (海拔 3 382 m)、拉脊山隧道^[6] (海拔 4 000 m) 等。然而,

自古以来, 高原山区是地质构造运动比较活跃的区域, 局部岩层中节理裂隙发育, 因此, 隧道施工过程中将不可避免地穿越围岩破碎地层。

中国最后一条通县公路——西藏扎墨公路被称为“天下第一难的”公路。嘎隆拉隧道是扎墨公路的控制性工程, 隧道全长为 3 310 m, 平均海拔为 3 700 m。施工隧道气象条件恶劣, 穿越多条地质断裂带, 岩体破碎, 涌水量大, 地质构造、水文地质条件极其复杂^[7-9]。嘎隆拉隧道自 2008 年 9 月 16 动工, 下半年穿越距波密进口端约 25 m (桩号 K48+260 处) 的围岩破碎带, 其洞体围岩软弱、破

收稿日期: 2011-05-13

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目 (No.50720135906); 国家自然科学基金 (No.41072238, 51004097)。

第一作者简介: 乔春江, 男, 1976 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事地下工程方面的试验与现场监测研究工作。E-mail: 961343546@qq.com

碎,属于强风化黑云母石英片岩,具有强度低、压缩性高、自稳和自承能力差等特点(见图1),该破碎带给隧道施工带来一系列问题。该段隧道施工过程中的施工方法、围岩及支护体系的力学特性成为人们关注的焦点。



图1 嘎隆拉隧道破碎围岩地层
Fig.1 Broken rock mass of Galongla tunnel

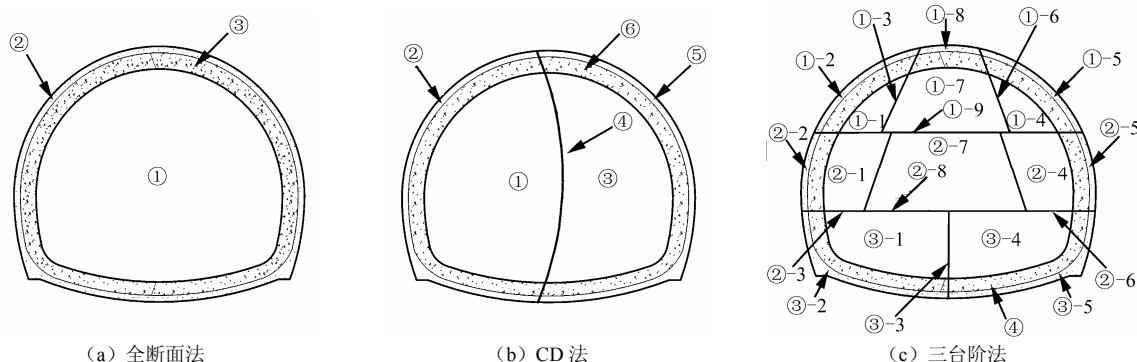


图2 隧道施工方法
Fig.2 Construction methods of tunnel

施工方案及顺序:

(1) 全断面法: (a) 施作超前注浆小导管; (b) 开挖①部, 同时施作初次衬砌②和锚杆; (c) 经监控量测后, 铺设防水板, 施工仰拱及填充; (d) 施工缝清理, 施作防水层, 施工拱、墙混凝土, 施作二衬③封闭成环。

(2) CD法: (a) 施作超前注浆小导管; (b) 开挖左侧①部, 同时施作初次衬砌②、临时支撑③和锚杆; (c) 开挖右侧④部, 同时施作初次衬砌⑤和锚杆; (d) 经监控量测后, 拆除洞内临时支撑③, 铺设防水板, 施工仰拱及填充; (e) 施工缝清理, 施作防水层, 施工拱、墙混凝土, 施作二衬⑥封闭成环。

(3) 三台阶法: (a) 施作超前注浆小导管; (b) 开挖上台阶左侧①-1部, 同时施作初次衬砌①-2、临时支撑①-3和锚杆; (c) 开挖上台阶右侧①-4部, 同时施作初次衬砌①-5、临时支撑①-6和锚杆; (d) 开挖上台阶核心土①-7部, 同时施作初次衬砌

在高海拔和高寒地区修建隧道, 尤其是围岩破碎带的合理施工方法研究是世界性的综合技术难题^[10]。本文通过数值仿真的方法, 对比分析全断面、台阶法和CD法施工时围岩及支护结构的受力特征, 并针对施工过程进行三维数值模拟, 为破碎地层合理施工方法的确定提供科学依据。

2 隧道进口段破碎围岩施工方法研究

隧道穿越破碎围岩地层的施工工法直接影响到支护结构上土压力荷载的大小及围岩体和支护结构的受力特征。应用数值仿真方法对比研究全断面法、CD法和三台阶法(见图2)时, 波密进口段K48+260处围岩和支护结构在全封闭衬砌方案下的受力情况。

①-8、临时支撑①-9和锚杆; (e) 开挖中台阶左侧②-1部, 同时施作初次衬砌②-1、临时支撑②-3和锚杆; (f) 开挖中台阶左侧②-4部, 同时施作初次衬砌②-5、临时支撑②-6和锚杆; (g) 开挖中台阶核心土②-7部, 同时施作临时支撑②-8; (h) 开挖下台阶左侧③-1部, 同时施作初次衬砌③-2、临时支撑③-3和锚杆; (i) 开挖下台阶右侧③-4部, 同时施作初次衬砌③-5和锚杆; (j) 经监控量测后, 拆除洞内临时支撑, 铺设防水板, 施工仰拱及填充; (k) 施工缝清理, 施作防水层, 施工拱、墙混凝土, 施作二衬④封闭成环。

2.1 有限元模型

计算模型所取的断面位于波密进口段K48+260处, 根据工程勘察资料得到地质剖面有限元模型(见图3), 模拟了从小导管超前注浆开始, 然后分别由以上3种施工方法开挖完毕的过程。围岩和衬砌由二维4节点实体单元模拟, 锚杆和临时支撑由一维杆单元模拟。考虑到围岩节理裂隙较发育, 选用

ABAQUS 提供的 jointed material 模型^[11-12]来模拟围岩性质。围岩及隧道支护结构基本力学参数见表 1。

位移边界条件：模型左右两边界施加 X 方向的水平约束；模型底部边界施加 Y 方向的竖向约束；对整个模型施加岩土体自重压力。

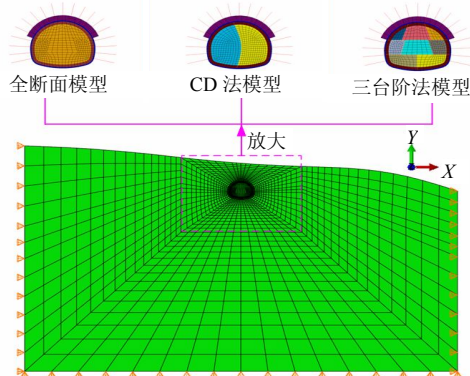


图 3 计算模型
Fig.3 Computing model

表 1 围岩及隧道支护结构基本力学参数
Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock and supporting structure of tunnel

材 料	密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 c /(MPa)	内摩擦角 φ /(°)
强风化黑云 母石英片岩	2.0	0.3	0.30	0.03	35
管 棚	3.0	40.0	0.30	30	50
初次衬砌	2.8	42.0	0.18	36	58
二次衬砌	2.8	45.0	0.20	38	60
锚 杆	7.8	105.0	0.20		
临时支撑	7.8	200.0	0.20		

2.2 数值仿真结果分析

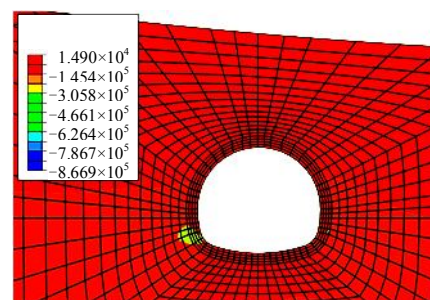
2.2.1 破碎地层施工方法对比分析

从围岩受力方面来看，采用 3 种方案开挖围岩受力分布较为一致，且由于隧道埋深较浅，围岩受力量值较小。拱顶处围岩出现少部分量值很小的拉应力，3 种开挖方案最大拉应力值均低于 0.02 MPa，而围岩的最大压应力值均小于 2.4 MPa，图 4 为三台阶法开挖后围岩受力分布云图。

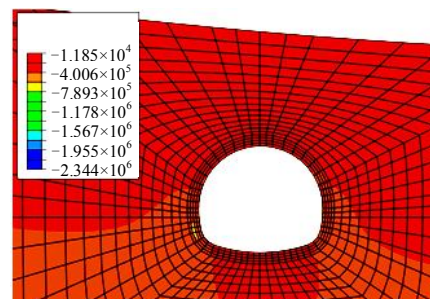
图 5 为不同开挖方案下初衬最大主应力分布情况，可以看出，全断面法开挖时在初衬拱腰两侧和左侧拱脚部分区域出现了 0.12~0.40 MPa 左右的拉应力区，最大拉应力为 0.43 MPa；CD 法开挖时初衬拱顶拱底与临时支撑相交的位置有 2.89~3.58 MPa 的拉应力，而在两侧拱腰部分区域出现了 0.46~1.10 MPa 左右的拉应力区；而三台阶法开挖后初衬拱腰与临时支撑相交的位置有 0.72~0.87 MPa 的拉应力，在拱顶位置出现有 0.13~0.40 MPa 左右的拉应力区。图 6 为不同开挖方案下初衬最小主应力分布云图，全断面法开挖时初衬上

部区域受压应力比较小，在 0.5~1.5 MPa 左右，下部压力相对较大，一般在 2~4.5 MPa；CD 法开挖时初衬与临时支撑相交部位出现了 8 MPa 左右的压应力，左侧拱脚位置出现局部位置压应力集中，大小在 7.52 MPa 左右；三台阶法开挖后拱脚部位出现了 5.5 MPa 左右的压应力，两侧拱腰位置压应力值在 4 MPa 左右。图 7 为不同开挖方案下锚杆最大主应力分布云图，全断面法开挖时锚杆最大受拉位置位于隧道两侧拱腰处，最大拉应力值在 66 MPa 左右；CD 法开挖时锚杆最大受拉位置位于拱顶偏左位置隧道内侧，最大值为 160 MPa，两侧拱腰处最大拉应力值在 63 MPa 左右；而利用三台阶法开挖时，锚杆最大受拉位置位于拱顶两侧位置隧道内侧，最大值为 171 MPa，两侧拱腰处最大拉应力值在 108 MPa 左右。

图 8 为不同开挖方案下围岩塑性区分布云图。采用全断面法开挖时，隧道两侧拱脚、拱肩位置出现了较大面积的塑性区，而且地表坡面位置也出现大范围塑性区，与隧道附近塑性区产生贯通。CD 法开挖时两侧拱脚、拱肩位置塑性区比较突出，小导管注浆管棚几乎全部达到塑性，坡面位置也有小部分区域进入塑性，总体来看，CD 法开挖比全断面法开挖时的塑性区面积小。三台阶法开挖后拱顶、拱肩位置塑性区面积比全断面法和 CD 法明显减少，小导管注浆管棚小部分区域达到塑性，而坡面位置岩层未进入塑性。



(a) 最大主应力云图



(b) 最小主应力云图

图 4 三台阶法开挖后围岩受力分布云图 (单位: Pa)
Fig.4 Stress distribution nephograms of surrounding rock with three-bench method (unit: Pa)

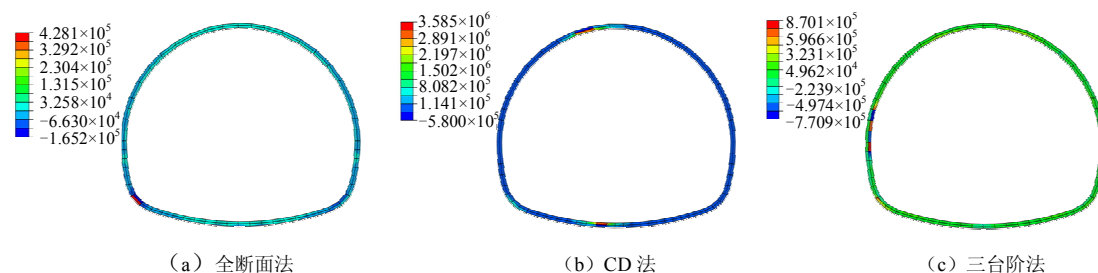


图 5 不同开挖方案下初衬最大主应力分布云图 (单位: Pa)

Fig.5 Maximum principal stress distribution nephograms of first lining with different excavation schemes (unit: Pa)

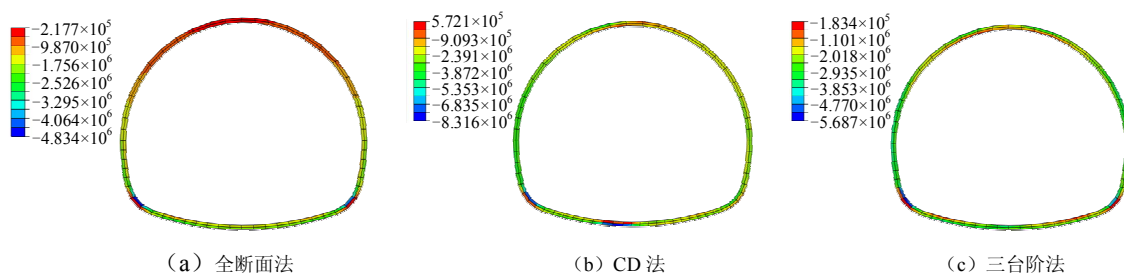


图 6 不同开挖方案下初衬最小主应力分布云图 (单位: Pa)

Fig.6 Minor principal stress distribution nephograms of first lining with different excavation schemes (unit: Pa)

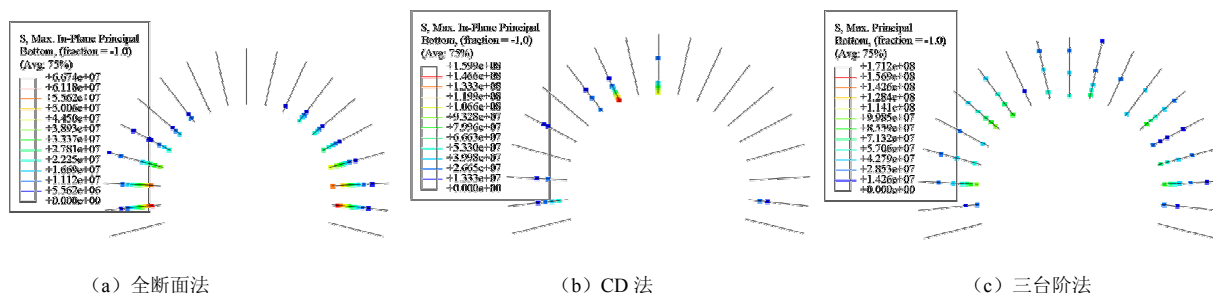


图 7 不同开挖方案下锚杆最大主应力分布云图 (单位: Pa)

Fig.7 Maximum principal stress distribution nephograms of bolts with different excavation schemes (unit: Pa)

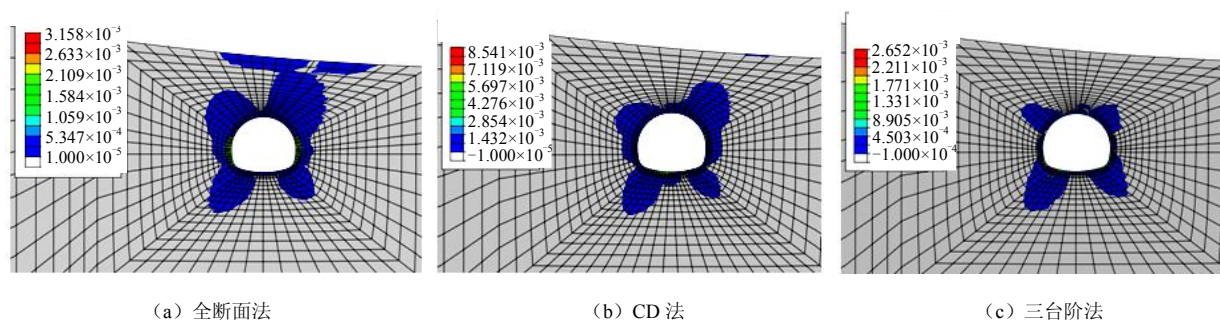


图 8 不同开挖方案下围岩塑性区分布云图

Fig.8 Plastic zone distribution nephograms of surrounding rock with different excavation schemes

2.2.2 破碎地层合理施工方法

对比 3 种开挖方案, 从支护结构受力情况看, 三台阶法开挖完毕后初衬拉应力区分布在拱顶、两侧拱腰很小的区域内, 最大拉应力值为 0.87 MPa,

围岩上面未出现明显的拉应力; 而受压方面, 除了在初衬左侧拱脚和拱底处出现 8.3 MPa 左右的压应力, 其余大部分区域受力要比其他方法小一些, 且围岩受到的压力也相对较小。在锚杆受力方面, 利

用三台阶法施工时, 拆除临时支撑过程虽然会导致局部锚杆受力较大, 但并没有达到其抗拉强度。对比图 7 中 3 种开挖方案锚杆受力分布可知, 利用三台阶法施工锚杆受力分布比较理想, 基本达到了支护效果, 而利用全断面法和 CD 法开挖时, 锚杆受力分布不均匀, 当采用全断面开挖时两侧拱腰处锚杆受力较大, 拱顶处锚杆受力较小, 采用 CD 法开挖时, 拱顶左侧锚杆受力较大, 拱腰处受力则相对较小。通过分析结构受力, 从整体来看, 利用三台阶法施工对围岩和支护结构受力较为有利。

由于该段隧道破碎围岩地层埋深浅, 岩石稳定性差, 隧道开挖易导致顶部岩体坍塌, 因此, 控制围岩塑性区至关重要。从塑性区大小来看, 采用三台阶法开挖时围岩塑性区面积最小, 且坡面位置没有产生塑性区, 全断面法、CD 法塑性区则较大, 甚至发展到了地表, 极易引起隧道顶部塌落。

通过以上分析可知, 利用三台阶法施工, 将整个断面开挖过程划分为多个小部分, 虽然施工工序较为繁琐, 但降低了隧道开挖对围岩的扰动, 最大程度地提高了围岩的自承能力, 较好地控制了围岩塑性区发育, 适合本隧道破碎围岩地层的施工。

3 破碎围岩施工过程三维仿真

3.1 三维有限元模型

利用三维数值仿真三台阶法施工时, 首先根据地质勘察资料建立嘎隆拉隧道波密进口端破碎围岩段三维有限元模型, 如图 9 所示, 模型共划分 77 319 个单元。围岩与衬砌单元采用 8 节点实体单元模拟, 锚杆采用梁单元模拟, 临时支撑采用壳单元模拟。超前小导管注浆区域模拟过程中采用改变该区域材料属性来实现超前注浆。围岩及隧道支护结构基本力学参数见表 1。

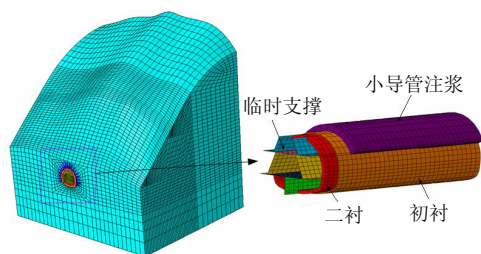


图 9 三台阶法三维有限元模型
Fig.9 Three-dimensional finite element model for three-bench method

三台阶法施工断面开挖以 5 m 作为一个循环开挖步, 共开挖 40 m。每一个循环开挖步分 3 个台阶开挖, 上、中层开挖均留核心土, 待各台阶断面初期支护完成后再开挖核心土部分。数值模拟第一步是

进行地应力平衡; 第二步是进行模型前 5 m 段的开挖, 三台阶法开挖示意图及相关介绍见图 2, 每部分开挖后及时施作初次衬砌支护、锚杆和临时支撑, 每一个循环开挖结束使初衬封闭成环, 并拆除临时支撑; 然后将其余 35 m 按同样方法以 5 m 为一个循环开挖步进行施工; 最后施作二次衬砌形成封闭环。

3.2 三台阶法施工模拟结果

三台阶法施工过程的围岩衬砌受力分析 (为了更清楚地看到开挖后围岩衬砌的受力云图, 将模型沿隧道轴线切开, 分左右两部分进行分析, 限于篇幅, 这里只给出每一个循环步下轴线右侧围岩衬砌的最大拉应力云图和开挖 40 m 时最小主应力云图)。

3.2.1 围岩、衬砌应力分布云图

图 10 为三台阶法开挖时, 随着开挖步增大, 隧道轴线纵剖面最大主应力云图。从图中可以看到, 随着隧道开挖, 初次衬砌底部及拱肩局部区域出现了较大的拉应力区, 最大值出现在开挖到 35~40 m 时拱肩位置, 其值为 1.08 MPa, 拱底位置拉应力区域较大, 但是量值相对较小。图 11 为开挖 40 m 后围岩和衬砌最小主应力云图, 从图中可以看出, 最小主应力出现在拱腰内侧位置, 最大值为 3.52 MPa。

3.2.2 围岩、衬砌变形分布云图

图 12 为三台阶法开挖 40 m 时围岩和衬砌位移变形云图。从图中可以看到, 变形相对隧道轴线基本对称, 当开挖完 40 m 时, 拱顶最大沉降为 8.71 mm, 底臃最大值为 9.21 mm。

为研究隧道三台阶法掘进过程对洞口变形的影响, 选取模型 A-A 截面, 布置关键点 (见图 13) 分析洞口变形情况, 并将数值计算结果与现场监测数据进行对比分析。隧道现场量测断面测点布置见图 14。掘进过程中 A-A 断面隧道周围关键点位移的数值计算结果与现场实测数据对比见图 15。从图中可以看出, 数值计算的隧道洞口围岩变形情况与现场实测数据变化趋势较一致, 这也验证了三维数值仿真三台阶法开挖过程的正确性。

通过分析隧道开挖对拱顶下沉、左右测点变形以及周边收敛情况可知隧道掘进对洞口变形影响较一致, 当开挖到 20 m 左右时, 对关键点位移影响逐渐变小。隧道开挖到 20 m 后, 拱顶沉降达到 8.6 mm 左右, 周边收敛为 4.5 mm 左右, 左右测点下沉量分别达到 4.8、5.4 mm 左右, 且变形基本保持稳定。

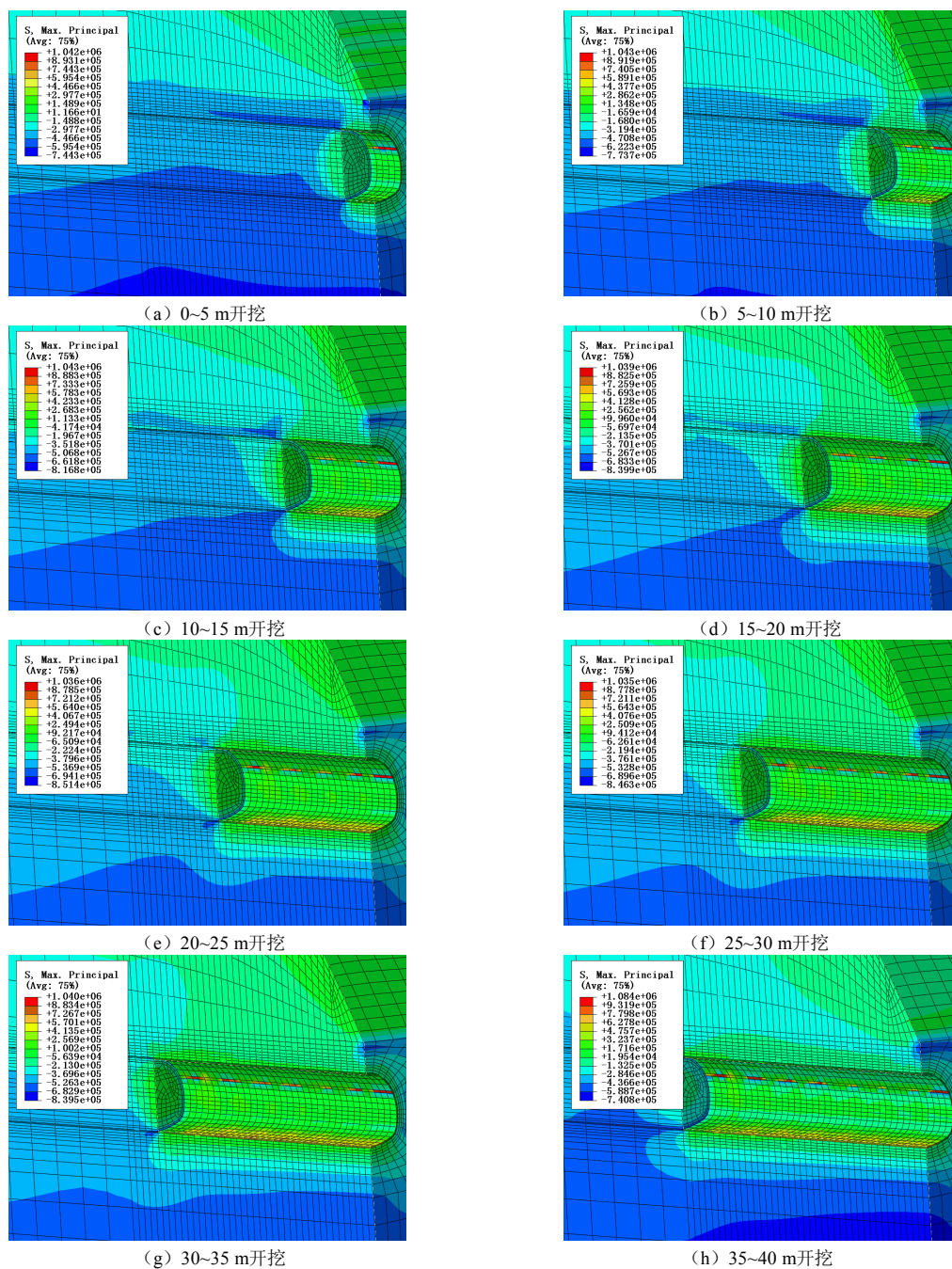


图 10 三台阶法开挖过程围岩和衬砌最大主应力云图 (单位: Pa)

Fig.10 Maximum principal stress distribution nephograms of surrounding rock and lining with three-bench method (unit: Pa)

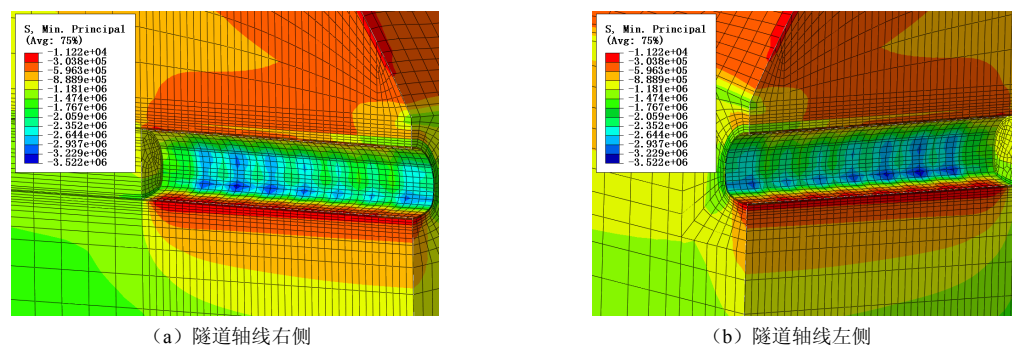


图 11 三台阶法开挖 40 m 时围岩和衬砌最小主应力云图 (单位: Pa)

Fig.11 Minor principal stress distribution nephograms of surrounding rock and lining after excavating 40 meters using three-bench method (unit: Pa)

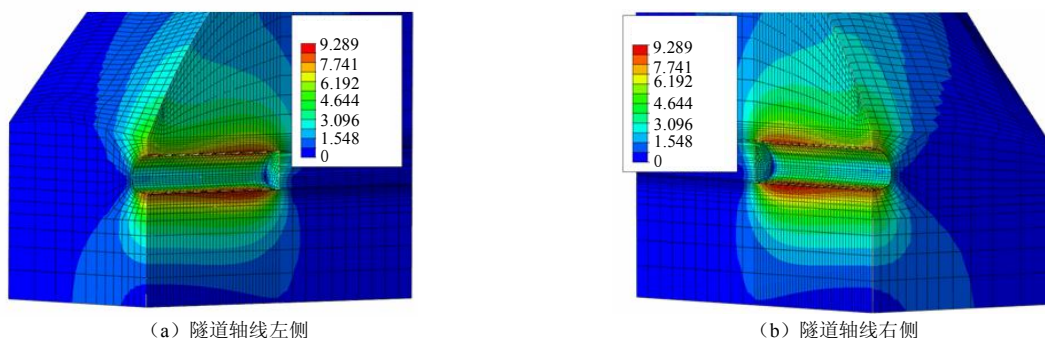


图12 三台阶法开挖40 m时围岩和衬砌位移云图 (单位: mm)

Fig.12 Displacement nephograms of surrounding rock and lining after excavating 40 meters using three-bench method (unit: mm)

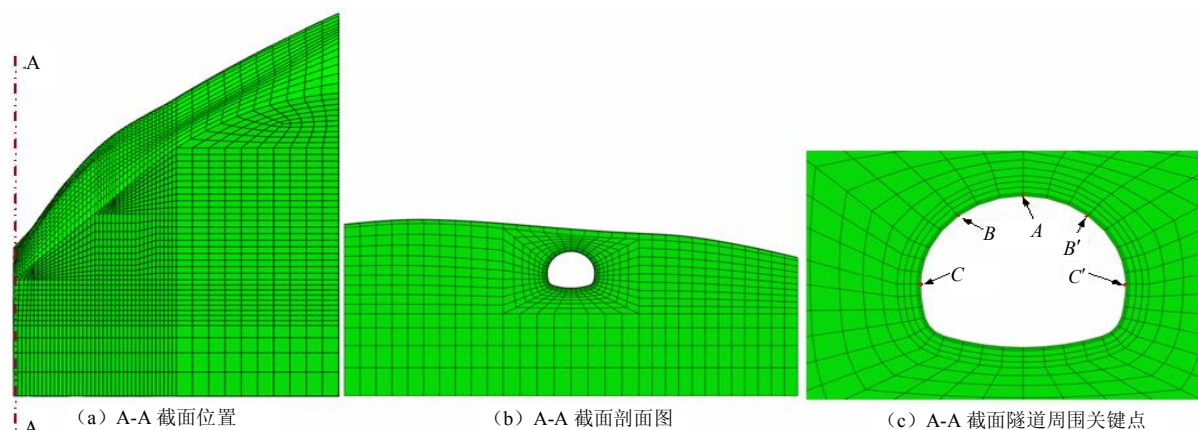


图13 A-A截面位置及周围关键点

Fig.13 Location of section A-A and key points

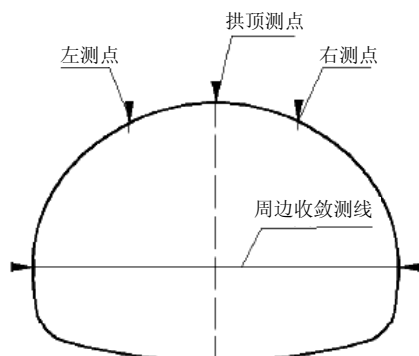


图14 隧道现场量测断面测点布置图

Fig.14 Measuring points arrangement of tunnel section on site

分析三台阶法开挖过程的数值仿真结果可知,衬砌支护在进口段破碎地层主要用来承担围岩压力,初衬的受力要比二衬大很多,一般拉应力集中出现在初衬与临时支撑相交的位置,因此,拆除临时支撑时应及时观测该位置变化情况并采取应急措施,而压应力则主要集中在初衬的拱腰处。由于洞口地段围岩破碎,隧道埋深浅,掘进过程极易造成失稳坍塌等灾害,因此,特别要注意隧道洞口附近

位置变形情况,通过对A-A截面关键点的位移分析可以看出,隧道开挖到20 m后隧道洞口变形趋于稳定,因此,要重点加强进口段前20 m左右的开挖支护和变形监测,以保证隧道进口段破碎带的顺利施工。

4 结 论

(1) 采用数值仿真方法对比研究3种不同施工方法下围岩及支护体系的力学特征,研究发现三台阶法是适合嘎隆拉隧道破碎围岩开挖的合理方法,同时对三台阶法的施工过程进行三维数值仿真,并将计算结果与现场实测洞口变形情况进行对比分析,发现位移变化趋势较一致,这也验证了数值仿真的合理性。

(2) 本文的研究工作可用于嘎隆拉隧道破碎围岩地层施工和同类工程建设。由于嘎隆拉隧道所处位置的独特地形和复杂的地质状况,导致施工过程中遇到了许多前所未有的问题,但是通过众多工作人员的共同努力,克服艰难险阻,确保了嘎隆拉隧道的成功贯通。

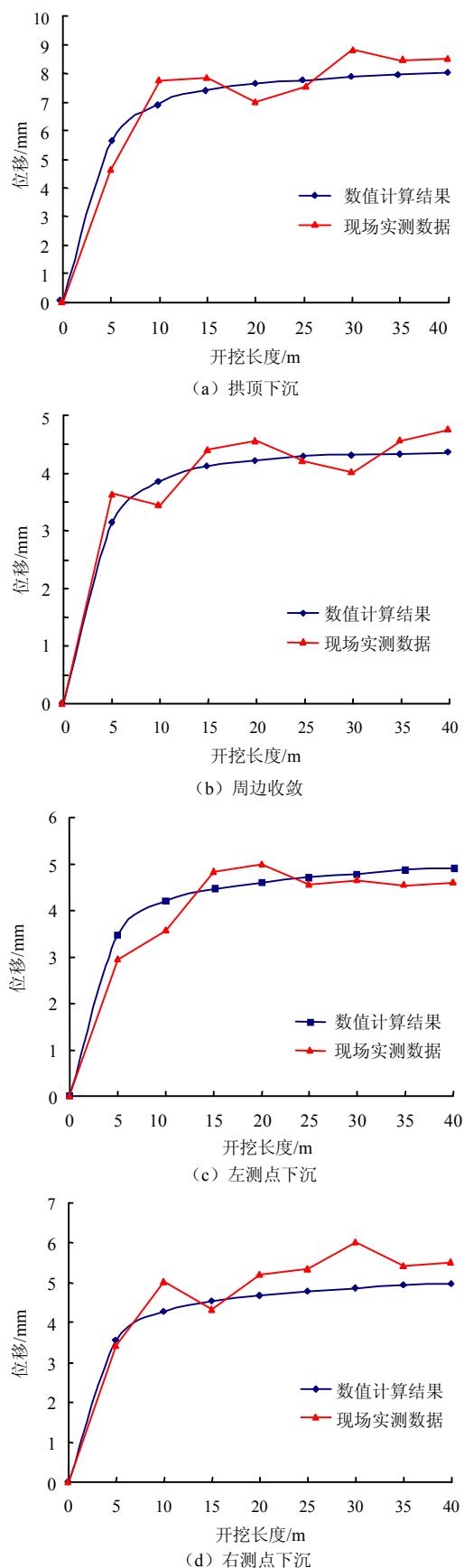


图15 三台阶法掘进过程A-A断面隧道周围关键点位移变化曲线

Fig.15 Displacement curves of key points in section A-A during excavation with three-bench method

参考文献

- [1] 杜彬. 高海拔高寒隧道综合施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 1): 2453—2456.
DU Bin. Construction technique research for high elevation tunnel in cold weather[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Supp.1): 2453—2456.
- [2] 张全胜, 高广运, 杨更社, 等. 寒区隧道围岩变形机理分析初探[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 307—314.
ZHANG Quan-sheng, GAO Guang-yun, YANG Geng-she, et al. A study of freezing deformation of tunnel surrounding rock in cold region[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(2): 307—314.
- [3] 朱永全, 贾晓云, 张雪雁. 高海拔、高寒区、冻土隧道洞内施工环境控制技术[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2177—2180.
ZHU Yong-quan, JIA Xiao-yun, ZHANG Xue-yan. Circumstances controlling technology of high altitude tunnel during construction in permafrost regions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2177—2180.
- [4] 张钊, 楚涌池. 跨越高原冻土的铁路——青藏铁路[J]. 铁道工程学报, 2005, (增刊): 177—184.
ZHANG Zhao, CHU Yong-chi. The first plateau permafrost railway construction in China—Qinghai-Tibet railway[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2005, (Supp.): 177—184.
- [5] 王进华. 祁连山隧道工程地质勘察与评价[J]. 铁道勘察, 2009, (6): 57—59.
WANG Jin-hua. Exploration and evaluation on geology of tunnel engineering[J]. **Railway Investigation and Surveying**, 2009, (6): 57—59.
- [6] 祝存芳. 拉脊山隧道出口进洞施工方案[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, (9): 65—67.
ZHU Cun-fang. Entering construction scheme of Lajishan tunnel exit[J]. **Road Machinery & Construction Mechanization**, 2008, (9): 65—67.
- [7] 李致, 王秋梅. 扎(木)墨(脱)公路病害分析与处治[J]. 西部交通科技, 2009, (11): 37—41.
LI Zhi, WANG Qiu-mei. The analysis and counter-measure of defects in Zha-Mo road[J]. **Western China Communications Science & Technology**, 2009, (11): 37—41.
- [8] 胡江顺, 傅荣华, 何天牛, 等. 墨脱公路地质灾害发育分布特征[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(3): 231—