

基于 FLAC3D 隧道初期支护方案研究

——以青医西院区站隧道为例

邓文科¹, 张全文¹, 曲家新¹, 由洋旭¹, 王刚², 贺鹏³, 高虎³

(1. 中交一航局城市轨道交通工程有限公司, 天津 300457; 2. 福建工程学院土木工程学院, 福州 350118;
3. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 利用 FLAC3D 软件建立两种不同初期支护方式作用下的隧道模型, 对隧道的开挖与支护过程进行模拟, 分析围岩与支护结构的受力和变形, 对比其应力分布和围岩位移情况, 选出更为合理的支护方案。研究发现, 预应力锚杆能够及时为隧道围岩提供支护作用, 不存在支护时效的问题, 而普通水泥砂浆锚杆需等地层产生变位后才能发挥作用。

关键词: FLAC3D; 初期支护; 围岩应力; 围岩位移

中图分类号: U459 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)03-0228-06

隧道工程施工较为烦琐和复杂, 施工过程通常会遇到诸多的困难^[1]。开挖时容易引起隧洞的失稳和破坏, 不及时处理则危石会逐渐增多, 甚至出现冒顶, 严重威胁施工安全和进度, 并可能影响隧洞的围岩失稳和破坏^[2]。对于巷道和隧道工程, 仅仅依靠普通螺纹钢锚杆很难控制围岩的变形, 有的通过高强预应力锚杆来控制围岩的复杂变形^[3], 对于软弱岩体, 也有通过让压锚杆从而达到更好的效果^[4], 所以在隧道开挖过程中选择合理的支护方案尤为重要。为解决目前初期支护安全性评价方法的缺陷, 结合工程概况, 运用数值模拟软件对围岩应力与围岩位移进行分析^[5], 明确隧道施工过程对于初期支护安全性判定的重要性。研究结果对于初期支护结构的设计具有重要意义。

1 工程概况

地铁隧道车站主体结构标准段净宽 18.5 m, 开挖宽度约 19.8 m, 开挖高度约 17.69 m, 如图 1 所示。主体隧道全部位于微风化岩层中, 拱顶埋深 25.7~28.6 m, 覆盖岩厚度 19.5~24.2 m。拟建场地及其周围沿线未见采空区、岩溶、地裂缝、有害气体等不良地质作用, 不良地质作用不发育。由于构

造裂隙和节理面分布特征不均匀且十分复杂, 构造裂隙水的分布、水量、径流方向、承压性受构造裂隙及节理面特征的影响。为了确保隧洞安全, 进行合理的初期支护设计及评价对比, 对加快施工进度、保证工程安全具有重要意义。揭露段岩体完整性指数 $K_v \geq 0.6$, 属于较完整的较硬岩或坚硬岩石, 为 II 级围岩; 而节理发育带的岩体完整性指数 K_v 为 0.34~0.45, 属较破碎的较硬岩或坚硬岩, 围岩等级为 III、IV 级。

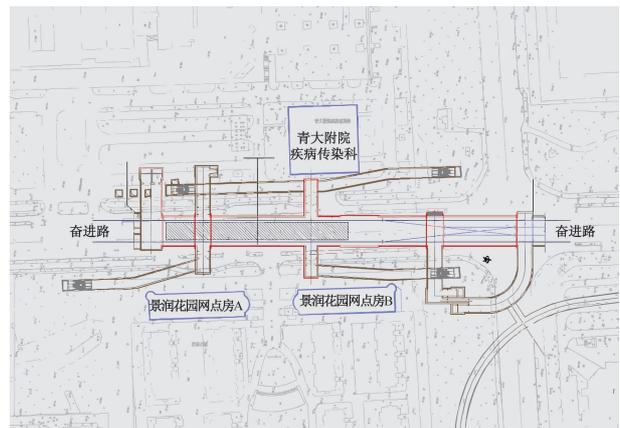


图 1 地铁隧道车站平面位置图

收稿日期: 2023-07-19

作者简介: 邓文科(1989—), 男, 山西大同人, 工程师, 研究方向为公路、铁路工程施工项目管理; 张全文(1992—) 男, 河北唐山人, 研究方向为公路工程施工项目管理; 曲家新(1979—), 男, 辽宁盖州人, 高级工程师, 研究方向为公路、铁路工程及市政工程施工项目管理; 由洋旭(1993—), 男, 河北张家口人, 研究方向为公路、铁路工程施工项目管理; 王刚(1976—), 男, 山东聊城人, 教授, 博士, 研究方向为地下工程支护理论和工程实践; 贺鹏(1988—), 男, 山东莱芜人, 副教授, 博士, 研究方向为裂隙岩体灾变机理与协同防控; 高虎(2000—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为土木水利。

2 不同初期支护方案评价

2.1 传统初期支护方案

《地铁设计规范》(GB 50175—2013)^[6]规定采用矿山法施工的地下结构应选用复合式衬砌。复合式衬砌中的初期支护形式主要依据围岩条件进行确定。初期支护类型及其适用条件见表 1。

表 1 初期支护类型及其适用条件

初期支护类型	适用条件
锚杆+喷射混凝土支护	具有自稳能力的岩石类地层
锚杆+钢拱架+喷射混凝土支护	不能长期自稳的岩石地层
超前支护+钢拱架+喷射混凝土支护	土质地层

该地铁区站整个站体围岩类别为Ⅲ、Ⅳ级,《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)^[7]中给出了各级围岩自稳能力的判断依据。隧道跨度为 10~20 m 时,Ⅲ级围岩可稳定复合式衬砌中的初期支护用以承受施工期间的全部荷载。支护参数可按照工程类比法确定,通过施工期间的监控量测进行调整修正。该区站主体隧道跨度达 19.8 m,属于特大跨度隧道,国家标准规范中很少有关于特大跨度隧道,因此采用工程类比与理论计算相结合的方法确定锚喷支护的设计参数。

2.2 基于主动支护体系的初期支护设计

按照锚固方式的不同,预应力锚杆可以分为机械式预应力锚杆、黏结式预应力锚杆。采用机械式锚固的预应力锚杆以涨壳式预应力锚杆为典型代表,采用黏结式锚固的预应力锚杆常用的有树脂预应力锚杆、水泥药卷预应力锚杆^[8]。锚杆类型应根据工程要求、锚固岩土层的性质、锚杆抗拉承载力、工程条件等因素综合确定^[9]。除此之外,为了实现隧道的及时主动支护,能否在设锚杆后及时施加预应力也是需要重点考虑的因素。上述两种不同类型预应力锚杆的工作特性与适用条件见表 2。

表 2 不同类型预应力锚杆的工作特性与适用条件

锚杆类型	工作特性	优缺点	适用条件
涨壳式中空预应力锚杆	可在开挖后立即提供主动支护抗力,锚杆长度可达 20 m 以上	具备安装迅速,可零延时施加预应力的优点,但锚固效果受岩土层性质影响较大	适用于岩石强度高、完整性好且成孔性好的中硬岩体
树脂预应力锚杆	起锚力时限在 10 min 左右,可在开挖后及时主动提供支护抗力	具备凝结速度快、锚固效果好、锚固力高等优点,但是树脂类黏结材料成本略高	适用于各类岩土体的锚固工程

3 隧道模型建立

3.1 数值理论

快速拉格朗日差分分析(fast Lagrangian analysis of continua,FLAC)渊源于流体动力学,最早用于固体力学领域。FLAC3D 由美国 Itasca Consulting Goup Inc 开发后,已成为目前岩土力学计算中的重要数值方法之一^[10]。

三维快速拉格朗日法是一种基于三维显式有限差分法的数值分析方法,它可以模拟岩土或其他材料的三维力学特性。三维快速拉格朗日分析将计算区域划分为若干四面体单元,每个单元在给定的边界条件下遵循指定的线性或非线性本构关系。如果单元应力使得材料屈服或产生塑性流动,则单元网格可以随着材料的变形而变形。三维快速拉格朗日分析采用了显式有限差分格式来求解场的控制微分方程,并应用了混合单元离散模型,可以准确地模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形,尤其在材料的弹塑性分析、大变形分析以及模拟施工过程等领域有其独到的优点。

该程序较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学特性,特别适用于分析渐进破坏失稳以及模拟大变形。它包含 11 种弹塑性材料本构模型,有静力、动力、蠕变、渗流、温度等多种计算模式,各种模式间可以互相耦合,可以模拟多种结构形式,如岩体、土体或其他材料实体,可以模拟梁、锚元、桩、壳以及人工结构,如支护、衬砌、锚索、岩栓、土工格栅、摩擦桩、板桩、分界面单元等,还可以模拟复杂的岩土工程力学问题。

FLAC3D 相较于其他数值模拟软件有以下几个特点:一是采用显式解题方案,可以为不稳定的物理过程提供稳定解答;二是界面可产生滑动或分离,用于模拟岩土体中的节理与断层;三是内置材料模型丰富,可满足大部分岩土工程问题的要求^[11-12]。

3.2 模型建立

3.2.1 计算范围

选用 FLAC3D 连续介质有限差分软件对该地铁区站主体隧道的支护过程进行模拟与求解^[13]。为了减小边界效应对求解结果的影响,左、右边界至隧道洞壁的距离均取隧道跨度的 5 倍,上边界取至地表自由面,下边界至隧道底部的距离取 5 倍的隧道高度,岩土体边界尺寸约为 112 m×134 m,纵向取 2 倍的锚杆间距,简化为平面应变问题。

3.2.2 力学模型

将岩土体视为理想的弹塑性材料,岩土体采用实体单元进行模拟并服从 Mohr-Coulomb 屈服准则,被开挖的岩体采用零模型进行模拟。隧道的初期支护结构采用 FLAC3D 内置的结构单元进行模拟,其中用 shell 单元模拟喷混,用 cable 单元模拟普通水泥砂浆锚杆以及树脂预应力锚杆。

3.2.3 边界条件

模型的左、右边界约束法向即 x 方向的位移,模型底部固定,约束 3 个方向的位移,模型的上表面为自由条件。

利用 FLAC3D 中的内置建模功能进行建模并划分网格。建立的隧道模型如图 2 所示。

3.3 开挖及支护参数

该地铁区站主体隧道开挖与支护模拟过程一共包括 7 个计算步:生成初始地应力场→开挖上台阶→上台阶支护→开挖中台阶→中台阶支护→开挖下台阶→下台阶支护。其中岩土层与初期支护的材料参数按照表 3 进行选取。

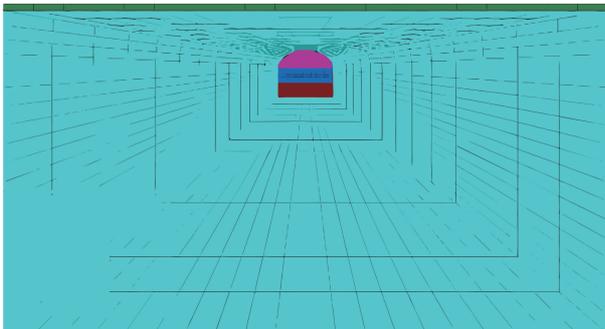
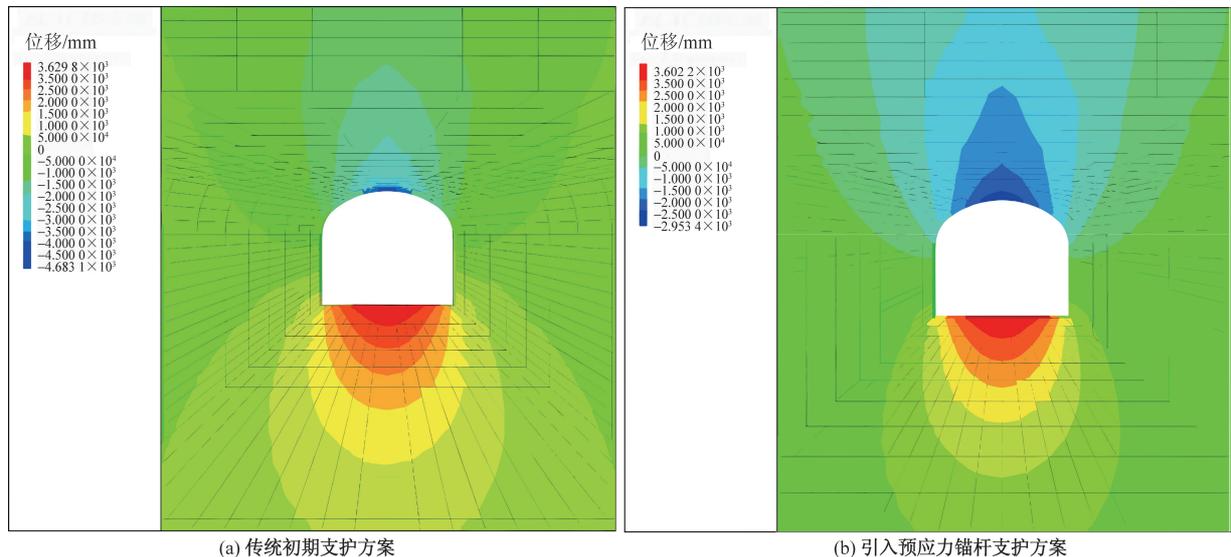


图 2 隧道模型



(a) 传统初期支护方案

(b) 引入预应力锚杆支护方案

图 3 不同支护方案围岩位移

表 3 初支各材料参数

锚杆种类	弹性模量/kPa	泊松比	抗拉强度/MPa
普通锚杆	2.1×10^8	0.2	335×10^3
预应力锚杆	2.1×10^8	0.2	500×10^3

通过设置锚杆端头的极大锚固剂参数来实现非全长预应力锚杆的模拟,创建结构单元时将预应力锚杆分为端头、自由段、锚固段 3 段,分别对这 3 段赋予不同的属性,锚杆端头的锚固参数设为极大值,这样施加预应力时锚杆端头便不会发生滑动,然后再在锚杆自由段施加与设计预应力数值相等的拉力。

生成初始地应力场之后,应将地应力作用下实体单元的结点位移全部清零,然后再利用 null 模型模拟上台阶开挖。开挖步完成后,围岩发生变形,其应力重新分布,而后立即沿上台阶开挖面建立 shell 单元与 cable 单元模拟锚喷支护。隧道中台阶与下台阶开挖与支护的模拟步骤与上台阶类似,都是在上一计算步完成后利用零模型模拟开挖,并在相应开挖面建立结构单元模拟锚喷支护。

4 数值结果分析

4.1 不同支护类型围岩位移分析

由图 3 可以看出,普通水泥砂浆锚杆和预应力锚杆控制隧道洞壁周边围岩位移的能力存在较为明显的差异。预应力锚杆能够及时为隧道围岩提供支护作用,不存在支护时效的问题;而普通水泥砂浆锚杆需等地层产生变位后才能发挥作用。围岩等级相同时,基于预应力锚杆的初期支护作用下隧道的拱顶沉降以及侧墙的水平收敛数值都比采用传统初期支护方案时要小。通过围岩位移情况

和锚杆的位移变化情况,可以针对性地确定合理有效的锚杆支护方案。

4.2 不同支护类型围岩应力分析

如图 4、图 5 所示,在拱脚、拱顶、边墙等处,引入预应力锚杆的初期支护方案与传统初期支护方案相比,围岩的最大主应力减小,最小主应力增大,并且在围岩应力方面也有相同的变化趋势,并且在拱脚和墙脚附近出现了应力集中现象,拱脚与墙脚处的应力值较大,而拱顶处的应力值较小。和支护方案与传统初期支护方案相比,围岩的最大主应力减小,最小主应力增大。这说明预应力支护强度与围岩应力更加接近,从而有更好的支护效果。

4.3 不同支护方案锚杆轴力分析

如图 6 所示,无论是Ⅲ级围岩还是Ⅳ级围岩,传

统初期支护方案中在拱脚和边墙中部的普通砂浆锚杆相对于其他位置的锚杆受力较大一些,这是由于拱脚和边墙中部的变位较大,围岩与锚杆之间发生相对位移,锚杆开始发挥支护作用。但由于青医西院区站主体隧道处于微风化花岗岩层,岩石硬度较大,围岩变形的量级较小,因此普通水泥砂浆锚杆的受力较小,支护效应发挥得不明显。而预应力锚杆由于人为施加了预拉力,能够主动提供支护抗力,整个锚杆轴力较大,发挥了较好的支护作用^[14-17]。

5 结论

(1)由隧道开挖的数值模拟的分析结果可以看出,岩体属于较为破碎的岩体的情况下,使用树脂预应力锚杆很好地克服了涨壳式中空预应力锚杆不宜用于节理发育的岩体的缺点,又能够在隧道开

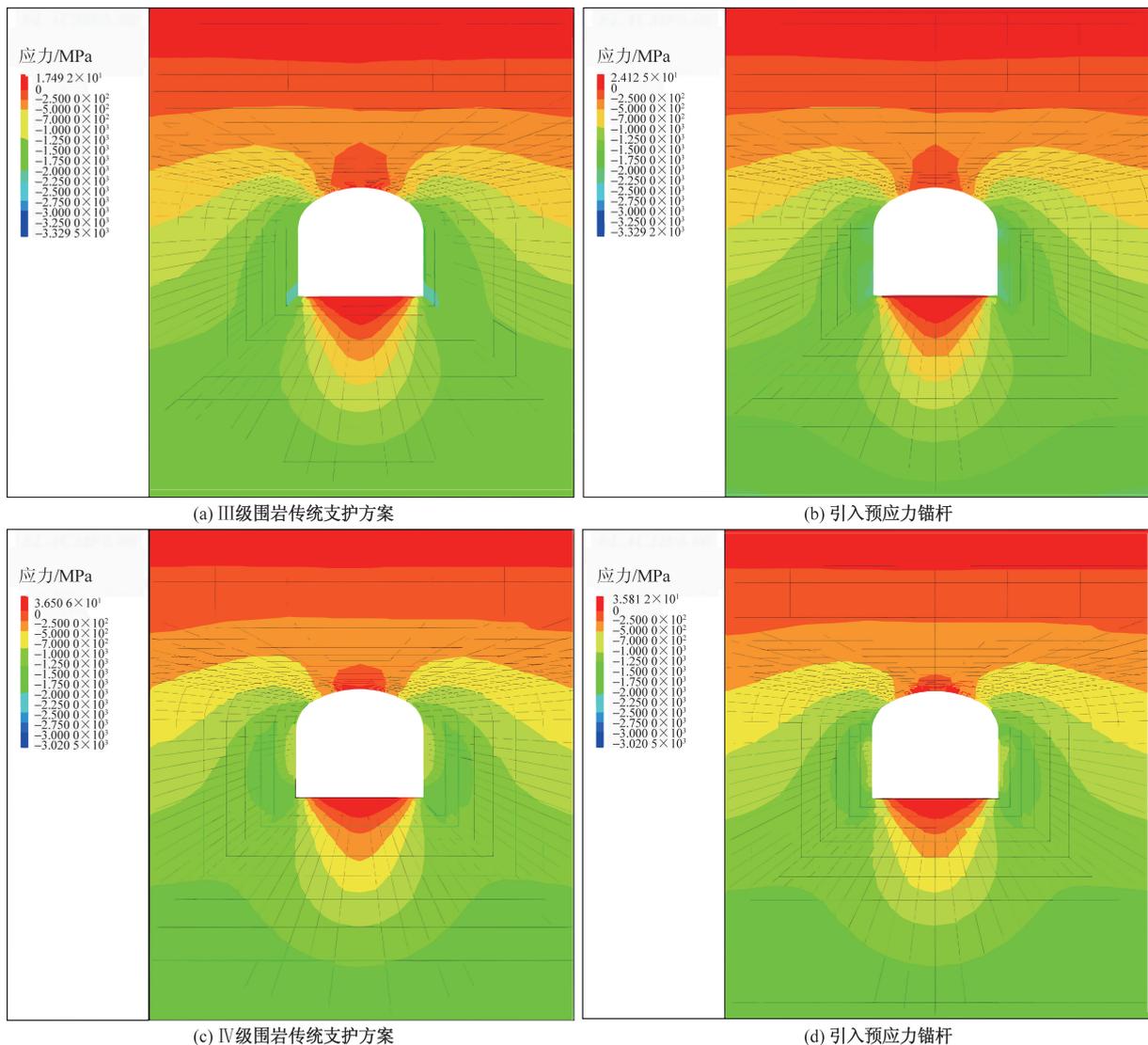


图 4 不同围岩下支护方案最大主应力云图

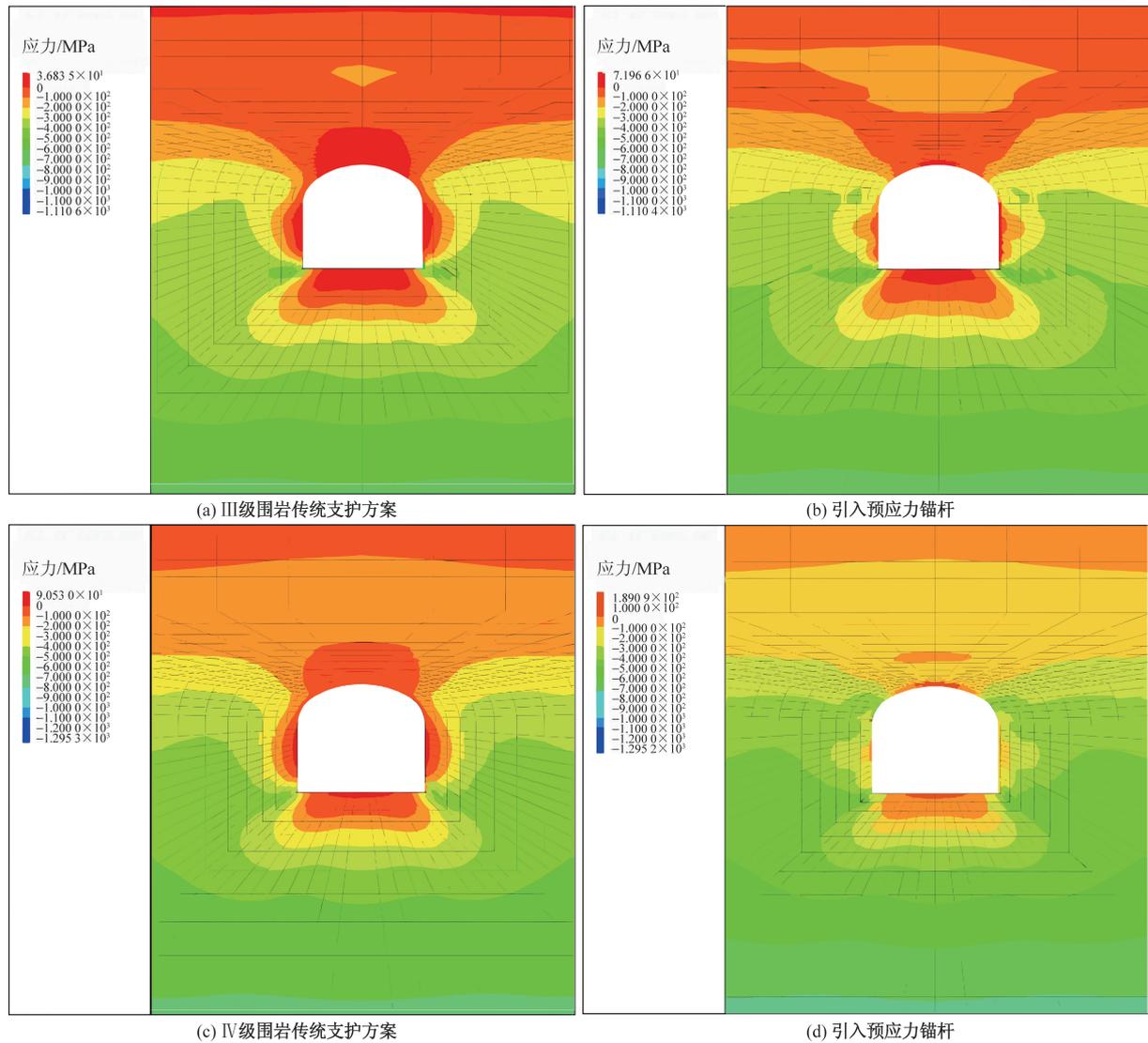


图 5 不同围岩下支护方案最小主应力云图

挖后及时主动提供支护抗力。

(2)通过 FLAC3D 模拟两种支护方案,对比两种施工方案的位移变形、轴力,综合考虑,预应力锚杆能够及时为隧道围岩提供支护作用,不存在支护时效的问题,而普通水泥砂浆锚杆需等地层产生变形后才能发挥作用。

(3)传统初期支护对于拱脚和边墙中部相较于其他位置受力更大,支护效果不明显,而预应力锚杆由于施加了预拉应力,能够主动提供支护,对于岩石硬度大、围岩变形小的区域,支护效果更好。

参考文献

- [1] 马行之, 钟科, 徐东明, 等. 浅埋大断面隧道过破碎带开挖支护方案对比研究: 以青岛地铁 6 号线创智谷站为例[J]. 隧道建设, 2022, 42(6): 1061-1070.
- [2] 顾耀民, 陈艳会, 杨凡. 软弱围岩隧洞初期支护设计[J]. 中国水能及电气化, 2017(7): 35-39.
- [3] 秦忠诚, 王备备, 刘玉腾, 等. 高强预应力让压锚杆在复杂围岩中的应用[J]. 金属矿山, 2015(11): 133-136.
- [4] 李卓. 让压锚杆在深埋软岩输水隧洞的支护效应与应用[J]. 东北水利水电, 2019, 37(7): 13, 71.
- [5] 郭坦, 魏永辉. 马兰矿底抽巷支护方案及数值模拟研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(17): 85-87.
- [6] 地铁设计规范: GB 50175—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [7] 公路隧道设计规范: JTG D70—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [8] 胡瀚超. 锚固围岩变形对锚杆支护作用的影响分析[J]. 山西化工, 2022, 42(3): 178-179.
- [9] 肖广智. 铁路隧道施工主动控制变形技术研究与实践[J]. 隧道建设, 2018, 38(7): 1087-1094.
- [10] 张在忠. 路堑边坡不同开挖顺序的效果分析[J]. 公路与

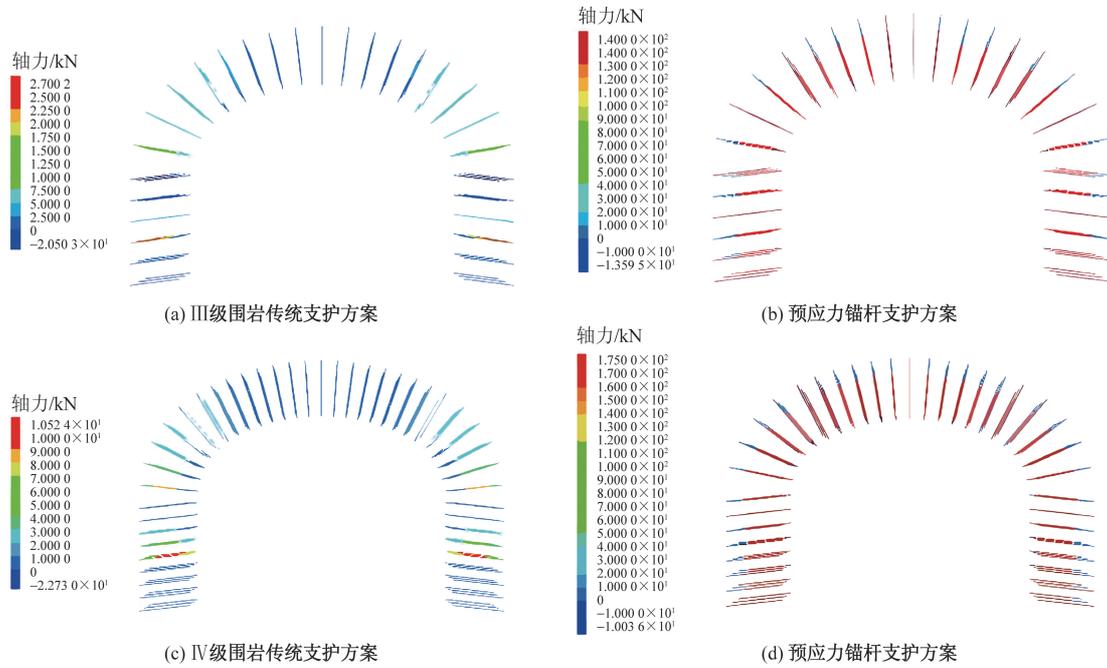


图6 不同围岩下支护方案锚杆轴力云图

- 汽运, 2006(2): 74-76.
- [11] 王铁男, 郝哲. FLAC 在地铁隧道数值模拟中的应用[J]. 沈阳大学学报, 2010, 22(1): 11-14.
- [12] 徐剑波, 姜平, 朱颂阳, 等. 基于现场监测和数值模拟的隧道初期支护效果分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 22(5): 2061-2069.
- [13] 徐东强, 薛宇飞. 基于现场监测与数值模拟公路山岭隧道IV级围岩段仰拱优化分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(32): 83-88.
- [14] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [15] 彭杨有, 陶伟, 央金卓玛, 等. 不同开挖法对某隧道开挖的围岩稳定性分析[J]. 科技和产业, 2022, 22(12): 394-398.
- [16] 王润钰, 卢渊. 双侧壁导坑法隧道施工方案优化研究[J]. 科技和产业, 2022, 22(5): 368-374.
- [17] 侯丰, 刘府生. 深厚软土盾构隧道施工地表沉降数值模拟计算[J]. 科技和产业, 2021, 21(6): 294-298.

Study on Initial Tunnel Support Scheme Based on FLAC3D: Taking the West Campus Station Tunnel of Qingyi Hospital as an Example

DENG Wenke¹, ZHANG Quanwen¹, QU Jiixin¹, YOU Yangxu¹, WANG Gang², HE Peng³, GAO Hu³

(1. Urban Traffic Engineering Co., Ltd., CCCC First Navigation Engineering Bureau, Tianjin 300457, China;

2. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: FLAC3D software was used to establish two tunnel models under different initial support actions. The excavation and support process of the tunnel were simulated, the stress and deformation of surrounding rock and support structure were analyzed, and a more reasonable support scheme was selected under different stress distribution and displacement of surrounding rock. The results show that the prestressed bolt can provide timely support for the surrounding rock of the tunnel without the problem of support aging, while the ordinary cement mortar bolt can play its role only after the formation changes.

Keywords: FLAC3D; preliminary bracing; surrounding rock stress; surrounding rock displacement