不同支护作用下的隧道数值模拟研究

李帅营，张庆文，朱　东

（西南林业大学 土木工程学院，昆明 650224）

摘要：运用数值模拟技术分析了 4 种隧道支护方法对隧道稳定性的影响，包括仅开挖隧道、仅施作锚杆、仅施作喷射混凝土层以及同时施作锚杆和喷射混凝土层；对比了 4 种方法在塑性区分布、*Z* 方向位移和应力方面的差异，且根据对比结果对 4 种不同厚度的衬砌进行了筛选。结果表明：单独使用锚杆对提高隧道稳定性效果有限，而喷射混凝土层有效减小了塑性区、降低了位移并优化了应力分布，从而显著提升了隧道稳定性，厚 25 cm 的衬砌效果最佳。

关键词：隧道；支护方法；数值模拟；稳定性；衬砌

中图分类号：TU457　**文献标志码：**A　**文章编号：**1672－349X(2025)06－0036－08

DOI：10.16160/j.cnki.tsxyxb.2025.06.007

Numerical Simulation Research of Tunnels Under Different Support

LI Shuaiying，ZHANG Qingwen，ZHU Dong

（School of Civil Engineering，Southwest Forestry University，Kunming 650224，China）

Abstract：Numerical simulation is used to analyze the effects of four tunnel support methods on tunnel stability，including tunnel excavation alone，anchor bolt alone，shotcrete alone，and both anchor bolts and shotcrete at the same time. Differences in plastic zone distribution，Z-direction displacement and stress are compared，and lining thickness optimization is conducted accordingly. The results show that anchor bolt alone has limited stabilizing effects on the stability of the tunnel，while shotcrete layer has significantly improved the stability，reduced plastic zones，lowered displacement，and optimized stress distribution. By comparing the displacement，stress，plastic zone，and together with construction costs，a lining thickness of 25 cm is concluded to be optimal.

Key Words：tunnel；support methods；numerical simulation；stability；lining optimization

在隧道工程施工中，由于地质条件复杂、施工技术限制等，隧道稳定性问题日益突出。为了确保隧道施工和运营安全，合理的支护措施至关重要。数值模拟作为一种有效的分析方法，可以在隧道开挖和支护过程中模拟围岩和支护结构的相互作用，从而预测隧道稳定性。本文以大理Ⅱ段输水总干渠线路工程为例，运用这种方法研究了仅开挖毛洞、仅施作锚杆、仅施作喷射混凝土层以及施作锚杆＋喷射混凝土层 4 种不同支护方式对隧道稳定性的影响，以

收稿日期：2024－11－12

作者简介：李帅营(1999－)，男，河南许昌人，硕士，研究方向为隧道及地下工程。

通讯作者：张庆文(1966－)，男，云南昆明人，教授，博士，研究方向为岩石力学及隧道工程。

期为隧道工程设计提供理论依据和实践参考。

1　工程背景

1.1　工程概况

大理Ⅱ段输水总干渠线路位于澜沧江、金沙江与红河水系分水岭地带，地势西高东低，主要山脉和水系在祥云以西呈北西向展布、以东呈近南北向展布。输水总干渠起点为大理市长育村（与长江院节点）、终点为祥云县万家（与昆明院节点）、全长 104.071 km；设计引水流量为 120～135 m^3/s，渠首水面高程 1 986 m，渠末水面高程 1 956 m，总水头 30 m，全线平均底坡 0.29‰[1]。总干渠线路沿途由大小 17 座建筑物组成，包括隧洞、渡槽、暗涵、倒虹吸 4 种形式。其中，隧洞 7 条，全长 94.826 km，占本段线路长度的 91.12%；渡槽 2 座，全长 0.368 km，占本段线路长度的 0.35%；暗涵 5 条，全长 3.711 km，占本段线路长度的 3.57%；倒虹吸 3 座，全长 5.167 km，占本段线路长度的4.97%。输水总干渠的受水区有宾川牛井、大理市、弥渡弥城、巍山南诏、祥云祥城、祥云下庄、永胜县太阳平山。工程地理位置如图 1 所示。数值模拟所采用的背景为该工程的某一段。

图 1　滇中引水工程大理Ⅱ段地理位置图

1.2　地质背景

对本隧道工程进行地质勘察发现，该区域地层条件相对简单。围岩以Ⅲ级为主，主要由石灰岩和砂岩构成，硬度适中且力学性质良好，有利于隧道施工。节理裂隙均匀散布于岩层中，以闭合的构造节理和少量的张开小裂隙为主且未形成连续的破裂带，对围岩的连续性影响较小。地下水的主要补给来源是大气降水和地表水的渗透，其动态变化受到季节性气候变化和地表水流动的影响，虽然总体上保持相对稳定，但其波动性需要警惕。地下水在隧道区域内的流动路径和速度受到岩层节理裂隙的引导，局部区域可能形成富水带，导致施工期间出现间歇性的涌水现象。这些富水带虽然对围岩的侵蚀作用不显著，但在特定地质环境下，尤其是在节理裂隙密集区域，可能会影响围岩的稳定性，因此施工过程需特别注意水文地质问题。该区域的地震频率适中，历史上地震记录稀少且震级不高，因此地震对隧道的影响是可以预见的，应通过标准的抗震设计措施来确保项目的安全性和长期运行的可靠性[2]。总之，尽管该地质背景为隧道工程提供了有利条件，但仍需进行细致的地质监测和风险评估，以确保施工顺利与工程安全。

2　模型的建立与参数选取

2.1　计算简图

该隧道采用马蹄形的断面设计及全断面法施工。为简化分析并减少边界效应对计算结果的影响，模型的边界条件经过了优化设计，计算域上、下取 40 m，左、右取 50 m，纵向取 1 延米，取模型为二维，具体隧道模型见图 2。利用犀牛软件进行建模并生成网格模型[3]，然后将其导入 FLAC3D 软件中以进行数值模拟，同时对模型洞口区域进行网格加密处理。计算过程中的边界条件设定为：X 轴边界的水平方向位移受到约束，Y 轴边界的水平方向位移受到约束，Z 轴的底面边界位移受到约束，顶面设置为自由边界，上边界施加 2 MPa 均匀应力。本研究未考虑地下水的作用，仅将围岩的自重作为主要考虑因素。围岩的模拟采用实体单元，并将

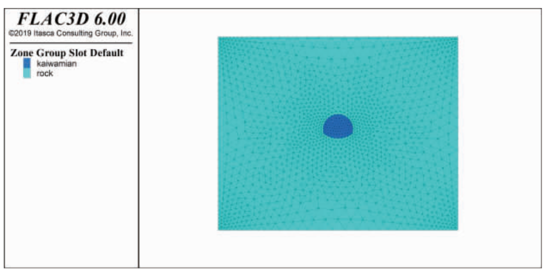


图 2　马蹄形隧道模型

岩土体视为理想的弹塑性材料。鉴于岩石裂隙结构相对简单，本研究未将围岩裂隙的影响纳入考量范围。岩体的模拟服从 Mohr-Coulomb 屈服准则，被挖掉的岩体通过零模型进行模拟以表示其被移除的状态；围岩采用实体单元模拟，服从 Mohr-Coulomb 准则；锚杆采用全长黏结的 cable 单元；衬砌结构采用 shell 单元[4]；FLAC3D 云图的插值方法采用 Polynomial Extrapolation(多项式外插法)显示。

2.2 计算参数

数值模拟所采用的围岩及衬砌的物理力学计算参数见表 1。

表 1 围岩和衬砌物理力学计算参数

项目名称	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量 E/Pa	泊松比	抗拉强度/Pa	黏聚力 c/Pa	内摩擦角 φ/(°)	厚度/mm
围岩	2 200	3×10^9	0.30	1×10^6	5×10^5	30	
衬砌	2 400	26×10^9	0.25				30

在利用 FLAC3D 软件进行数值模拟时，围岩的模拟采用摩尔-库伦弹塑性本构模型。在进行岩石力学的计算分析时，需要考虑多个模量参数，包括抗拉强度、黏聚力、内摩擦角、剪切模量和体积模量[5]。剪切模量和体积模量这两个关键参数可通过以下弹性力学中的公式转换计算得到：

$$\begin{cases}K=E/3(1-u)\\G=E/2(1+u)\end{cases}。$$

式中，K 为体积模量，单位为 Pa；E 为弹性模量，单位为 Pa；G 为剪切模量，单位为 Pa；u 为泊松比。

依据 FLAC3D 软件中锚杆(cable)单元的参数设置，模拟选取的锚杆计算参数见表 2。

表 2 锚杆结构力学计算参数

长度/m	直径/mm	弹性模量/GPa	砂浆剪切刚度/(MN·m^{-1})	砂浆黏结强度/(MN·m^{-1})
3	25	210	17.5	0.2

2.3 工况计算

为了比较 4 种支护效果，模拟计算设定了如表 3 所示的 4 种工况，相应的数值模拟可参考图 3。

表 3 不同支护作用下的计算工况

工况	工况描述
1	仅开挖毛洞
2	仅施作锚杆(cable 单元，21 根)
3	仅施作喷射混凝土层(shell 单元)
4	施作锚杆＋喷射混凝土层(cable 单元与 shell 单元)

3 数值模拟结果分析

3.1 隧道塑性区云图结果分析

通过对比分析图 4 中隧道塑性区的分布及表 4 中不同工况下塑性区的体积(图 4 中隧道洞口周围标红区域代表塑性区破坏范围)可以看出，在仅开挖毛洞和仅施作锚杆的情况下，锚杆的存在对隧道塑性区的分布几乎没有影响；同样，在仅施作喷射混凝土层及同时施作锚杆与喷射混凝土层的情况下，锚杆的有无对围岩塑性区的分布也没有显著影响。但当对比仅开挖毛洞和仅施作喷射混凝土层的情况时，可以发现衬砌的施加对隧道塑性区的分布产生了显著影响，即极大地减小了塑性区的范围。这一变化主要归因于以下因素：首先，喷射混凝土层通过对围岩施加压力增强了围岩的稳定性，从而有效地遏制了塑性区的进一步扩大；其次，衬砌与围岩接触面上的摩擦力有效地阻止了围岩的滑移，从而限制了塑性区的扩散；此外，喷射混凝土层与围岩之间的黏结力提高了两者的整体性，减少了塑性区的生成；更进一步的是，喷射混凝土层的支撑作用改变了围岩内部的应力分布，这不仅减少了塑性区的尺寸，也降低了其深度，同时接触面上的摩擦力和黏结力在消耗能量的过程中降低了围岩的变形能，从而显著减缓了塑性区的形成速度和扩展趋势。与之类似，在施作锚杆与同时施作锚杆和喷射混凝土层的对比中，衬砌的施加同样显著减小了塑性区的范围，且这种减小幅度与仅开挖毛洞和仅施作喷射混凝土层的情况一致。

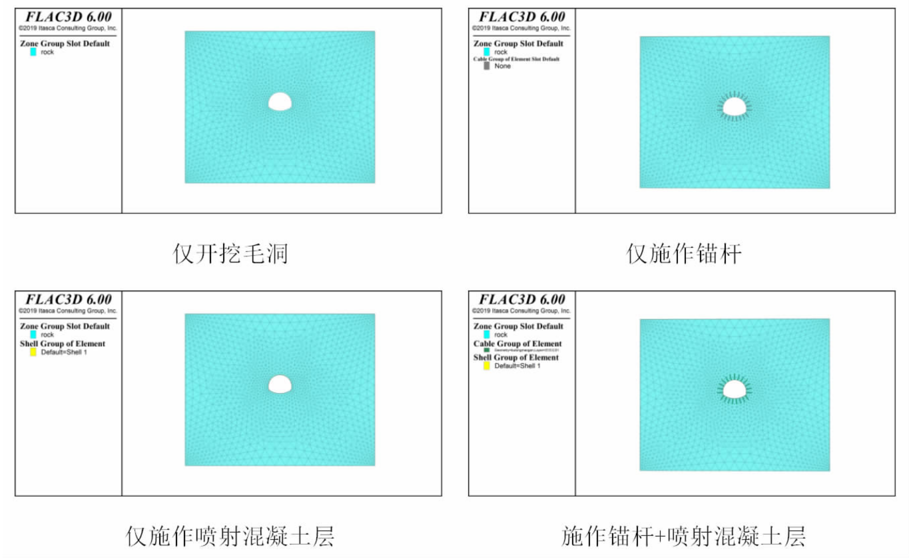


图 3　不同支护作用下的数值模拟图

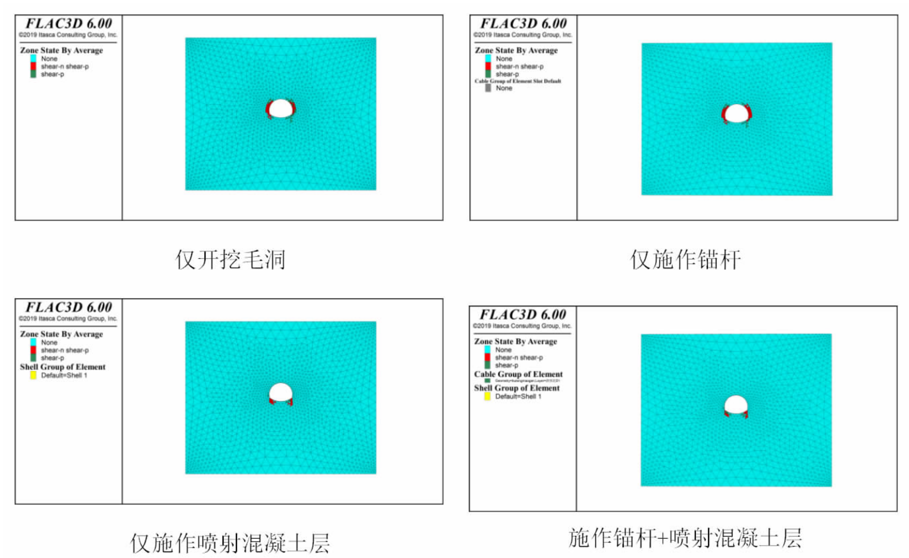


图 4　不同支护作用下隧道塑性区分布云图

表 4　不同支护作用下隧道塑性区体积

不同工况	仅开挖毛洞	仅施作锚杆	仅施作喷射混凝土层	施作锚杆＋喷射混凝土层
shear-n	23.731	22.459	9.132	8.288

3.2　隧道 Z 方向位移云图结果分析

不同支护作用下隧道 Z 方向位移云图见图 5。通过分析图 5 的位移云图(图中左侧底部蓝色数值表示洞口拱顶的沉降量,顶部红色数值反映了拱底的隆起程度)和图 6 的位移折线图可得出以下结论。

(1)在仅开挖毛洞和仅施作锚杆的情况下,锚杆的加入对隧道的位移几乎没有影响。具体来说,拱顶的沉降量保持在 8.64 mm,拱底的隆起量为 6.37 mm,这表明仅施作锚杆对减少拱顶沉降和拱底隆起的作用微乎其微。

(2)在仅施作喷射混凝土层和施作锚杆加喷射混凝土层的情况下,锚杆的加入同样对隧道位移没有显著影响。这两种情况下的拱顶沉降量为 5.92 mm,拱底隆起量为 5.09 mm。

(3)对比仅开挖毛洞和仅施作喷射混凝土

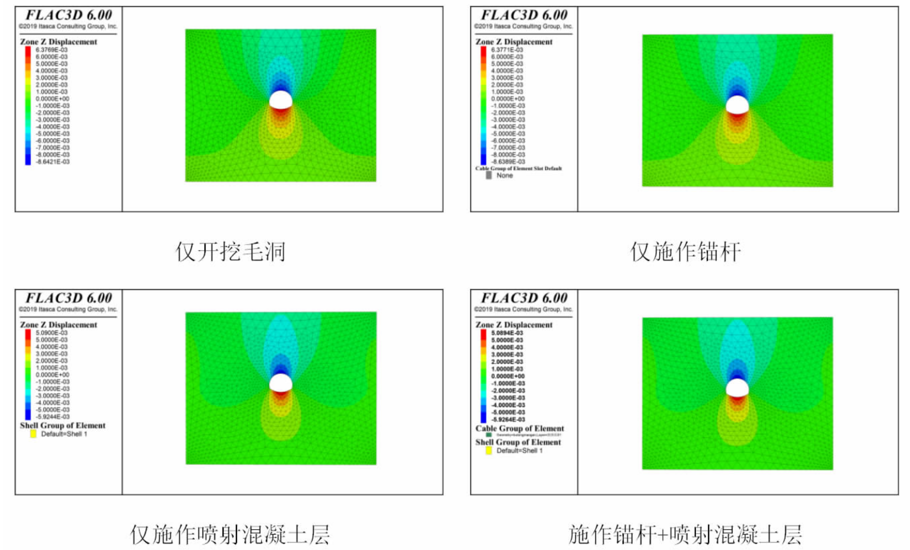


图 5　不同支护作用下隧道 Z 方向位移云图

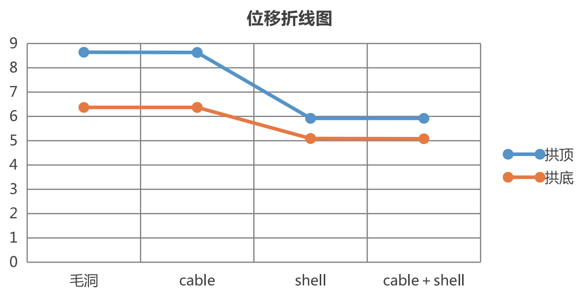


图 6　不同支护作用下隧道位移折线图

层的情况可看到:喷射混凝土层的施加显著改善了拱顶和拱底的位移,拱顶沉降量从 8.64 mm 减少到 5.92 mm,减少约 31%;拱底隆起量从 6.37 mm 减少到 5.09 mm,减少约 20%。这一改善主要得益于喷射混凝土层对衬砌所施加的压力,它不仅支撑了围岩、减轻了其内部应力,而且有效防止了位移的过度扩大。喷射混凝土层优异的抗压、抗剪性能与围岩的强化学和机械黏结力及其表面摩擦力共同作用,有效抵御了剪切、压缩和滑移,从而增强了围岩的稳定性,并将位移控制在安全可控的范围内。在仅施作锚杆与施作锚杆加喷射混凝土层的对比中也可以观察到位移也有相同程度的改善,这进一步证明了喷射混凝土层在控制隧道位移方面的有效性。

3.3　隧道 *Z* 方向应力云图结果分析

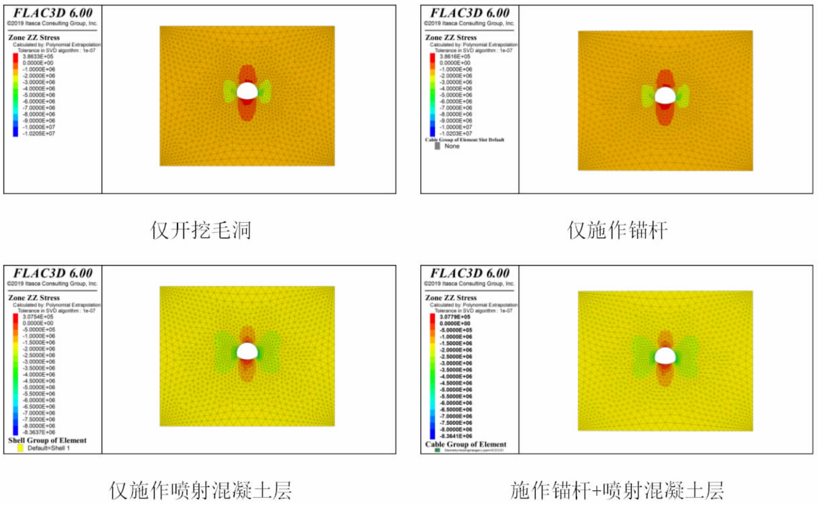
通过分析图 7 的应力云图(图中左侧顶部红色区域数值反映了拱顶和拱底趋于应力的数值)可得出以下结论。

(1)在仅开挖毛洞和仅施作锚杆的情况下,锚杆的加入对隧道的应力分布几乎没有影响。应力主要集中在拱顶和拱底区域,其值约为 3.86×10^{5} Pa。这表明仅施作锚杆对改善拱顶和拱底的应力分布没有显著作用。

(2)在施作喷射混凝土层和施作锚杆加喷射混凝土层的情况下,锚杆的加入同样对隧道应力分布没有显著影响。在这两种情况下,应力仍然主要集中在拱顶和拱底区域,其值约为 3.07×10^{5} Pa。

(3)当对比仅开挖毛洞和仅施作喷射混凝土层的情况时,可以看到喷射混凝土层的施加显著改善了应力集中的现象。拱顶和拱底的应力值从 3.86×10^{5} Pa 降低到 3.07×10^{5} Pa,表明喷射混凝土层的施加有效减小了应力,这种改善主要是由于喷射混凝土层在围岩面临外部荷载时能够主动分担部分应力,从而显著减少了围岩因应力过载而可能发生的破坏风险。此外,喷射混凝土层与围岩之间的摩擦力和黏结力形成了稳固的界面,这些相互作用力有效阻止了围岩的滑移和分离,维护了围岩的连续性和整体稳定性。这种摩擦和黏结作用不仅增强了围岩结构的整体性,还有助于将原本集中在开挖面的应力通过喷射混凝土层均匀地分散至

围岩的更大范围。这种应力重新分布的效果不仅减轻了围岩局部的应力集中，还预防了围岩发生过大的变形或破裂。这种应力缓解机制不仅提升了隧道的长期稳定性，也为施工安全提供了坚实的保障。在仅施作锚杆与施作锚杆加喷射混凝土层的对比中，也可以观察到应力有相似程度的改善，这进一步证明了喷射混凝土层在改善隧道应力分布方面的有效性。



仅开挖毛洞　仅施作锚杆

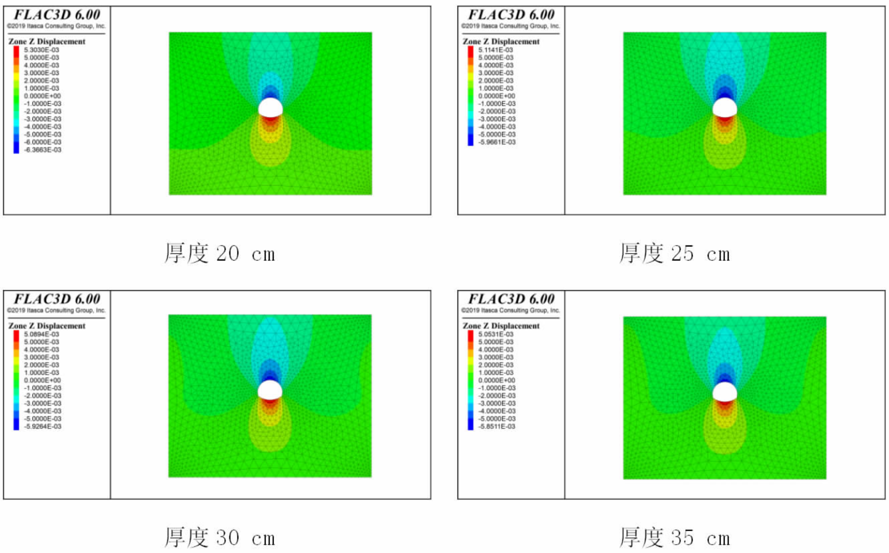
仅施作喷射混凝土层　施作锚杆+喷射混凝土层

图 7　不同支护作用下隧道 Z 方向应力云图

4　不同衬砌厚度下隧道的稳定性影响

鉴于锚杆作用有其局限性，而衬砌作用则显著有效，故而专门针对衬砌与锚杆相结合的支护结构进行了研究，旨在通过对衬砌厚度的调整，实现支护效果的优化。

（1）如图 8 的位移云图所示，不同衬砌厚度对位移的影响如下：当衬砌厚度为 20 cm 时，隧道顶部沉降为 6.37 mm，底部隆起为 5.30 mm；厚度增至 25 cm 时，顶部沉降降至 5.97 mm，底部隆起为 5.11 mm；进一步增加到 30 cm 时，顶部沉降和底部隆起分别降至 5.93 mm 和 5.09 mm；当厚度达到 35 cm 时，顶部沉降和底部隆起分别降至 5.85 mm 和 5.05 mm。数据分析表明，35 cm 衬砌厚度在控制隧道顶部和底部



厚度 20 cm　厚度 25 cm

厚度 30 cm　厚度 35 cm

图 8　不同衬砌厚度下隧道 Z 方向位移云图

位移方面表现最优，位移量最小；同时，25 cm 和 30 cm 厚度同样表现优异。综合考虑工程造价和工程实际情况，选择 25 cm 衬砌厚度最为适宜。

（2）通过分析图 9 的应力云图，发现施加 20 cm 和 25 cm 厚度的衬砌对缓解应力集中效果显著。拱顶和拱底的应力值从未支护时的 3.86×10^{5} Pa 降至 2.90×10^{5} Pa 和 2.93×10^{5} Pa，这表明喷射混凝土层在这两个衬砌厚度下均表现出优异的加固效果。

（3）对比图 10 中隧道塑性区的分布图与表 5 中不同衬砌厚度对应的塑性区体积数据，发现塑性区体积从小到大的顺序依次为 0.966，1.331，5.202，8.288。据此推断，当塑性区体积为 0.966 时，围岩的稳定性最佳，这一体积对应的衬砌厚度为 25 cm。

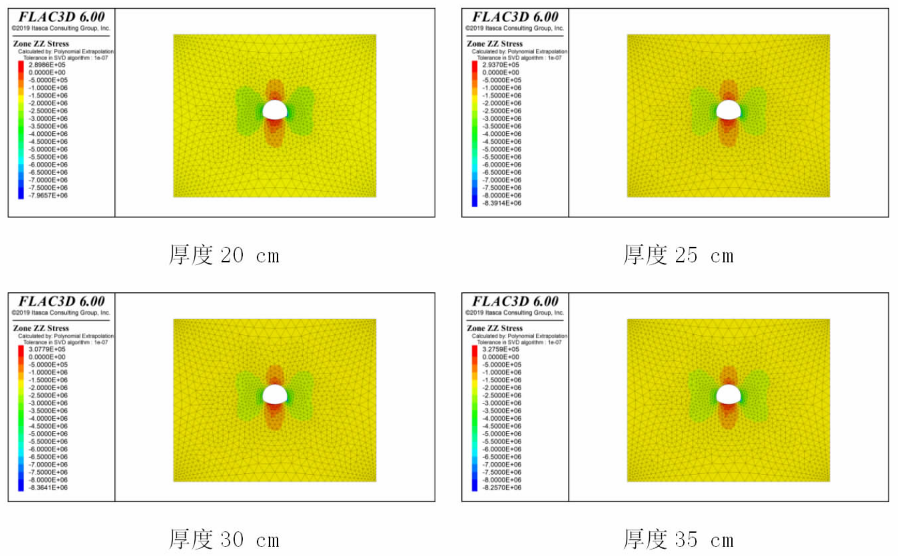


图 9　不同衬砌厚度下隧道 Z 方向应力云图

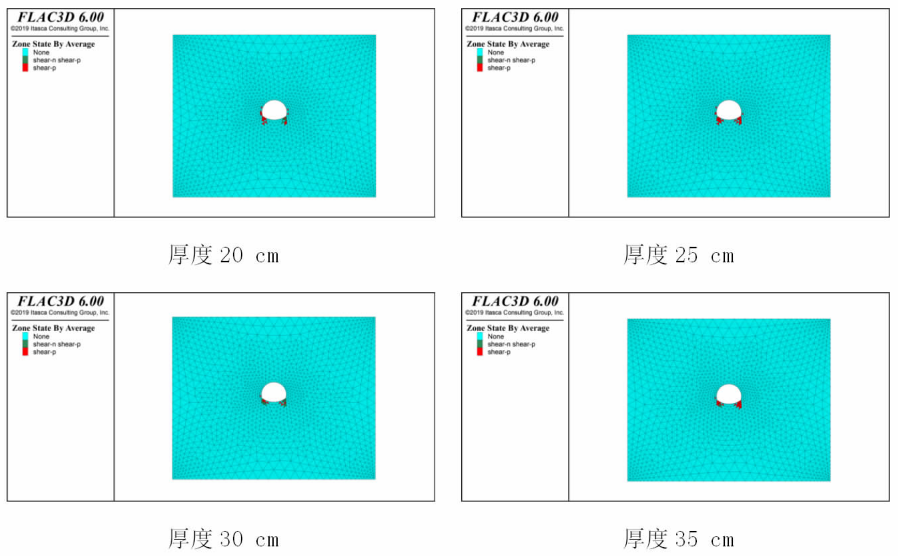


图 10　不同衬砌厚度下隧道塑性区云图

表 5　不同衬砌厚度下隧道塑性区体积

厚度/cm	20	25	30	35
shear-n	5.202	0.966	8.288	1.331

5　结论

本研究采用 FLAC3D 软件对隧道在 4 种不同支护方案下的工况进行了详尽的数值模

拟，结果如下。

(1)在同时施作锚杆和喷射混凝土层的工况下，模拟结果显示喷射混凝土层在减少围岩变形和抑制塑性区扩展方面发挥了主导作用；相比之下，锚杆的支护效果在此情况下并不显著。

(2)将仅施作锚杆与仅开挖毛洞的工况进行对比，发现这两种工况对围岩的塑性区扩展、变形和应力分布的影响差异并不明显。换句话说，锚杆的施作并未显著改善围岩的塑性区分布、位移和应力状况。

(3)当对比仅开挖毛洞与仅施作喷射混凝土层的工况时，发现喷射混凝土层的施加对围岩的变形和塑性区有显著的改善作用，能够有效改善围岩的塑性区分布、位移和应力，从而显著增强隧道的稳定性和安全性。同样的结论也适用于比较仅施作锚杆与施作锚杆加喷射混凝土层的情况。

(4)在评估工程造价和工期进度的基础上，结合 4 种不同衬砌厚度下的隧道位移、应力和塑性区数据，建议将原有的 30 cm 衬砌厚度调整为 25 cm。这种改动能够在确保安全的前提下有效减少支护材料的消耗且提高隧洞施工的效率，从而增加经济效益和社会效益。

综上，本研究结果表明，衬砌结构对于提升隧道的稳定性起着至关重要的作用，而锚杆的作用则相对较小；并且根据对比分析得出衬砌厚度可从 30 cm 调整为 25 cm，以节省工程造价。

参考文献：

[1] 罗中权，张学良，王丽娟. 滇中引水工程大理Ⅱ段隧洞断面监测成果分析评价[J]. 云南水力发电，2022，38(6)：57－61.

[2] 方智淳，朱正国，马超义，等. 岩溶隧道超前加固方案比选[J]. 铁道建筑，2020，60(10)：65－67.

[3] 叶明浩，高华光. 圭嘎拉隧道围岩稳定性及支护效果研究[J]. 地下水，2020，42(6)：131－133.

[4] 王刚. 隧道锚杆支护的数值模拟研究[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报，2019，18(4)：69－74.

[5] 刘嫦娥，张青，牟春来，等. 某水电站引水隧洞 TBM 支护选型设计[J]. 水电与新源，2021，35(7)：31－34.

(责任编校：白丽娟)

(上接第 35 页)

参考文献：

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图：GB18306－2015[S]. 北京：中国标准出版社，2015：2－6.

[2] 李小军，彭青. 不同类别场地地震动参数的计算分析[J]. 地震工程与工程振动，2001，21(1)：29－36.

[3] 李建亮，亢川川，何玉林，等. 场地条件对地面加速度峰值离散性的影响研究[J]. 震灾防御技术，2011，6(4)：416－426.

[4] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京：地震出版社，1999：58.

(责任编校：李秀荣)