

高地应力软岩隧道台阶法双层初期支护效果评价

彭 易¹, 陈志敏^{1,2}, 龚 军³, 张丹锋⁴, 李增印³

¹兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

²兰州交通大学, 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州

³中铁隧道集团一处有限公司, 重庆

⁴青海省交通建设管理有限公司, 青海 西宁

收稿日期: 2021年12月13日; 录用日期: 2021年12月18日; 发布日期: 2022年1月13日

摘 要

目前, 中西部地区存在的高地应力地质条件严重影响了隧道的正常施工, 并且由于山岭地区存在围岩强度较低的特点, 在实际的隧道施工中常出现软岩大变形现象。本文以某高地应力软岩隧道为工程背景, 采用数值模拟的方法, 研究了双层初期支护不同厚度组合条件下围岩竖向沉降和水平变化的规律, 对比分析得出适用于该高地应力软岩隧道的施工参数, 该研究结论可为今后类似工程施工提供参考。

关键词

隧道施工, 高地应力, 初期支护, 数值模拟

Evaluation of Double-Layer Initial Support Effect of Bench Method in High Stress Soft Rock Tunnel

Yi Peng¹, Zhimin Chen^{1,2}, Jun Gong³, Danfeng Zhang⁴, Zengyin Li³

¹School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

²National Local Joint Engineering Laboratory of Road and Bridge Engineering Disaster Prevention and Control Technology, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

³China Railway Tunnel Group No.1 Co., Ltd., Chongqing

⁴Qinghai Traffic Construction Management Co., Ltd., Xining Qinghai

Received: Dec. 13th, 2021; accepted: Dec. 18th, 2021; published: Jan. 13th, 2022

Abstract

At present, the high ground stress geological conditions in the central and western regions seriously affect the normal construction of the tunnel, and due to the low strength of surrounding rock in mountain areas, large deformation of soft rock often occurs in the actual tunnel construction. Taking a high stress soft rock tunnel as the engineering background, this paper studies the law of vertical settlement and horizontal change of surrounding rock under the condition of different thickness combination of double-layer initial support by using the method of numerical simulation, and obtains the construction parameters suitable for the high stress soft rock tunnel by comparative analysis. The research conclusion can provide reference for similar engineering construction in the future.

Keywords

Tunnel Construction, High Ground Stress, Initial Support, Numerical Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

隧道工程包括了开挖和支护两部分，有效的支护手段对控制围岩变形具有重要意义。对于控制软岩隧道大变形，比较常用的支护方式是柔性支护和刚性支护共同作用的复合支护体系。

郭晓龙等在传统收敛约束法的基础上，分析围岩的流变特性，并提出了一种多层支护的方法，该方法可承受大变形挤压软岩隧道长期稳定的流变压力[1]。孔超等为解决某深埋软岩隧道大变形的的问题，通过数值模拟和理论分析相结合的方法，通过计算得出了隧道不同位置处的围岩特征曲线，在此基础上建立隧道三维模型，分析支护结构承载机理[2]。陈明福以丽江 - 香格里拉铁路长坪隧道为背景，分析高地应力软岩隧道大变形机理及特征，通过现场实验进行研究[3]。周建等提出了一种基于Hoek-Brown强度准则并且考虑应力释放系数和锚杆位置的支护压力求解方法，根据工程实测验证了该支护结构压力计算方法的可靠性[4]。刘小俊在现场设置了多种不同的支护体系，量测试验段隧道围岩变形、围岩接触面压力及初支应力，结果表明复合初期支护体系(包括钢拱架、不同长度锚杆、喷射混凝土和超前注浆小导管)能有效控制高地应力条件下千枚岩隧道大变形[5]。王万平等提出了一种基于主动支护的初支体系，通过现场量测数据验证数值模拟的方法，对隧道在开挖过程中的围岩变形和初支应力进行了分析，该初支体系最终实现了较好的控制效果[6]。郭鹏等基于延性多级让压支护理念，提出一种适用于川藏铁路全线软岩隧道的新型延性支护结构，并采用FLAC3D软件对施工过程中围岩变形、初期支护及二衬支护体系的长期变形进行模拟分析[7]。Wang F.N 基于能量耦合支护原理设计了负泊松比锚索支护方案，进行了现场试验并对 NPR 锚索支护进行了评价研究，结果验证了所采用的 NPR 锚索支护体系的可行性[8]。

本文从支护结构控制围岩变形的角度出发，通过分析双层初期支护体系不同厚度组合以及第二层初支结构施作时间对围岩变形的影响，结合现场实际工程条件，提出了双层初支体系的施工参数。

2. 现场量测数据

宁缠隧道施工出现大变形情况后，设计单位按照 V 围岩参数对大变形段支护设计调整，施工单位组

织在 ZK41+060~ZK41+030 采用开展试验段一施工, 并对围岩变形情况量测。初期支护采用喷射混凝土、锚杆、钢筋网和双层钢拱组合支护。隧道开挖后应尽快施作初期支护, 形成初期支护环, 并在隧道周围形成加固环。在软岩大变形地段, 增加隧道预留变形值, 为围岩变形预留空间。

两部分实验段的区别在于: 试验段二在三台阶开挖基础上增设临时仰拱, 同时采用增长锚杆长度以及改变钢拱架型号、增加喷射混凝土厚度和增加钢筋网等措施提高支护刚度等措施。分别选取两试验段内各 3 个断面围岩变形量测结果统计, 见下表 1 所示。

Table 1. Field measurement results of the test section (unit: mm)

表 1. 试验段现场量测结果(单位: mm)

试验段	位置	拱顶下沉(mm)				水平收敛(mm)		
		1#	2#	3#	均值	A	B	均值
试验段一	ZK41+50	425.1	458.5	407.3	430.3	723.2	694.7	708.9
	ZK41+45	435.7	394.8	451.2	427.2	731.8	729.6	739.7
	ZK41+40	369.4	387.5	421.3	392.7	748.3	717.5	732.9
试验段二	ZK40+970	341.6	325.8	338.1	335.2	678.1	626.7	652.4
	ZK40+965	334.3	324.2	321.8	326.7	669.5	675.5	672.5
	ZK40+960	343.5	322.8	336.4	334.2	674.5	638.1	656.3

分析表 1 可可知, 在试验段一中三个不同断面处拱顶沉降量测平均值为 416.7 mm, 试验段二处拱顶沉降量测平均值为 332.1 mm, 减小了 84.6 mm。在试验段一中三个断面洞周收敛均值为 727.2 mm, 而试验段二中三个断面洞周收敛平均值为 660.4 mm, 相比于试验段一减小 66.8 mm。对比分析不同试验段施工方案, 发现及时调整施工方法和支护结构后, 试验段二的拱顶沉降和洞周收敛相比于试验段一都明显减小, 围岩整体变形量减小 20%左右。

3. 计算模型的建立及参数的选取

3.1. 建立数值计算模型

由于宁缠隧道大变形段围岩主要为炭质页岩与砂岩的互层结构, 岩层呈薄层状构造, 页岩中夹杂砂岩, 围岩级别为 V 级, 数值模拟过程中难以模拟实际围岩状态, 因此本文在数值计算中将其等效视作一种匀质材料。

隧道设计断面横向最大宽度 15.7 m, 竖向最大高度 12.1 m。由于宁缠隧道所处地应力水平较高且隧道埋深较深(最大埋深 500 米), 为简化计算过程, 模型不以实际埋深建立, 而是通过在模型边界施加等效于埋深的应力模拟实际应力状态。由宁缠隧道现场资料可知隧道及其周围位置横向应力 σ_x 为 18.5 MPa 左右, 竖向应力 σ_z 为 8.0 MPa 左右, 纵向应力 σ_y 为 10.3 MPa 左右。建立模型如图 1 所示, 模型尺寸横向(X 方向)和竖向(Y 方向)各取 100 m, 沿隧道轴线方向(Z 方向) 50 m, 即模型边界与隧道轮廓线的距离大于 3 倍隧道洞径, 可以忽略模型边界对数值计算结果的影响。模型均为实体单元, 整体数值模拟模型如图 1 所示。

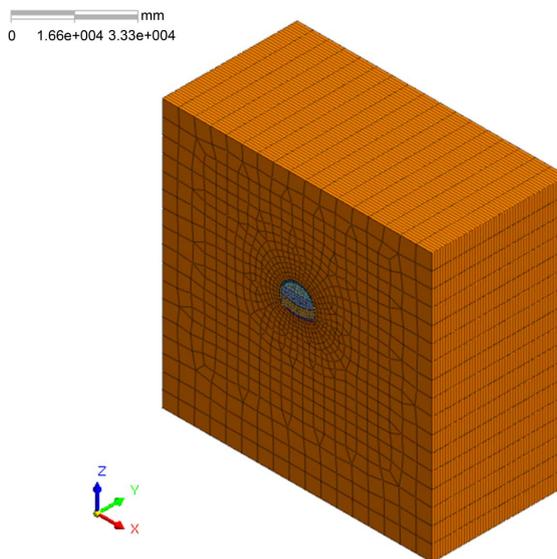


Figure 1. Numerical simulation model
图 1. 数值模拟模型

3.2. 模型参数选取

考虑到隧道开挖过程中围岩需要释放应力，因此模型采用刚度折减法，设置开挖围岩的弹性参数随场变量而减小，以此来模拟围岩应力释放的过程，计算模拟中取应力释放系数为 0.6。本隧道模型采用锚杆和喷射混凝土衬砌支护，另实际工程采用钢拱架喷锚共同支护的形式，其支护作用采用等效方法计算。参考现行《铁路隧道设计规范》，将钢拱架和钢筋网的弹性模量折算给混凝土，其计算方法为：

$$E_c = E_0 + \frac{A_s E_s}{A_c} \quad (1)$$

式中： E_c 为折算后混凝土弹性模量； E_0 为原混凝土弹性模量； A_s 为钢拱架截面积； E_s 为钢材模量； A_c 为混凝土面积。

折算后，数值模拟具体力学参数见表 2。

Table 2. Parameters of each material
表 2. 各材料参数表

材料	容重 γ (kN/m ³)	弹性模量 E (MPa)	泊松比	粘聚力(KPa)	内摩擦角(°)
V 级围岩	22	1500	0.34	87	26
喷射混凝土	25	33,500	0.2	-	-
锚杆	78.5	200,000	0.3	-	-

4. 不同厚度组合双层初支对围岩变形的影响分析

在双层初支体系中厚度的组合意味着作用效果的区别，其作用效果不仅仅只是两层不同厚度单层初支的叠加。因此，为了分析不同厚度下双层初支体系的位移抑制效果，在双层初支总厚度相同条件下，设置多种不同的工况进行对比分析。具体工况见表 3。

Table 3. Combined operating conditions of different thicknesses
表 3. 不同厚度组合工况表

工况	第一层初支厚度(cm)	第二层初支厚度(cm)	两层初支总厚度(cm)	第二层初支施作时间
I	25	30	55	中台阶开挖前
II	30	25	55	中台阶开挖前
III	35	20	55	中台阶开挖前
IV	40	15	55	中台阶开挖前

1) 不同厚度组合下双层初支体系的拱顶沉降

不同工况下竖直方向拱顶沉降云图如图 2 和图 3 所示。

从图 2 和图 3 可以看出，四种工况下隧道拱顶沉降的变化趋势是相同的，上台阶掌子面施作之前隧道产生了较大的超前变形，开挖后拱顶沉降速率明显增大，但第二层初期支护施工完成后，隧道变形速率开始逐渐减小，这种变化趋势代表了双层初支系统对抑制隧道拱顶沉降还是具有一定的作用。

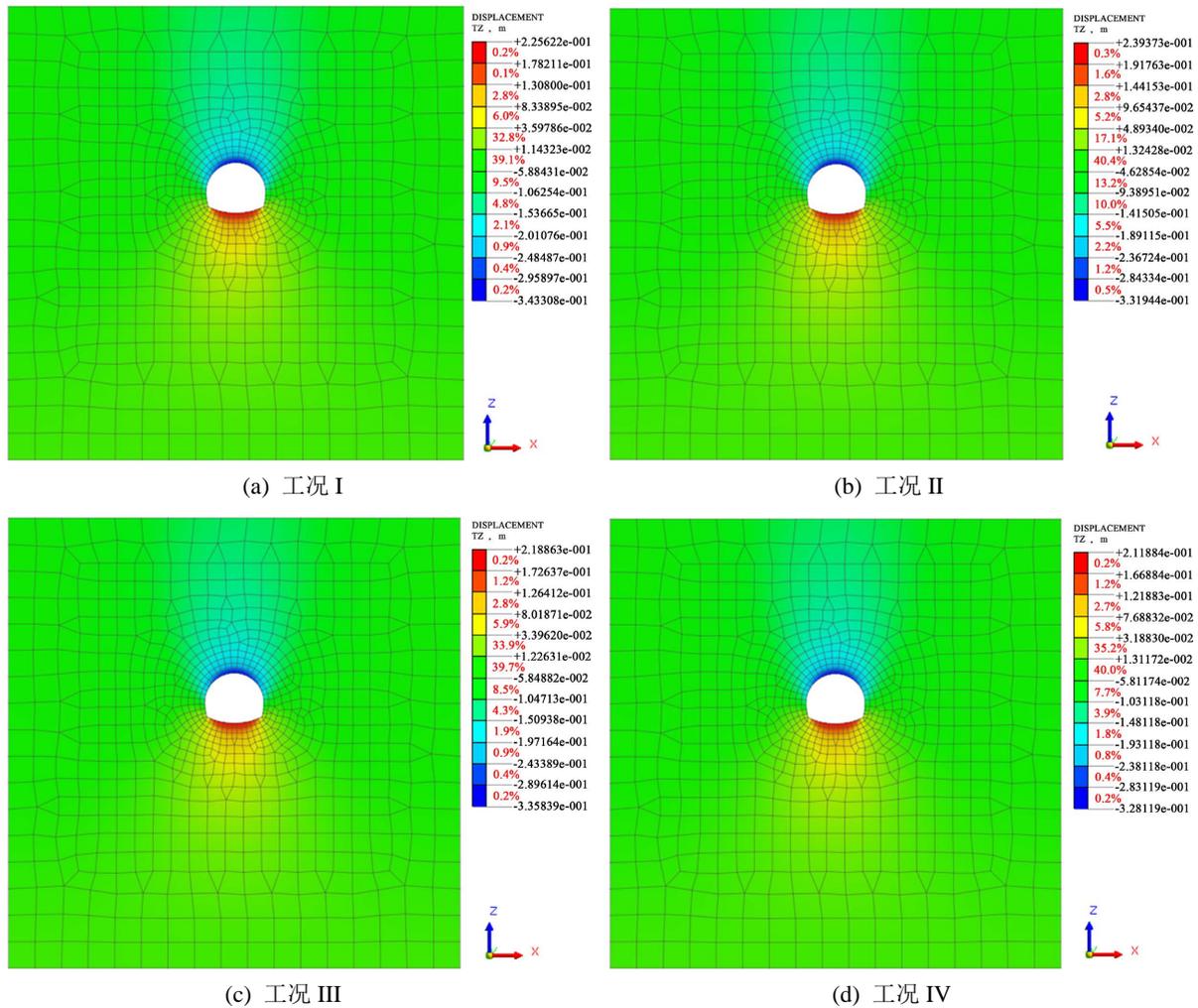


Figure 2. Surrounding rock vault settlement cloud image
图 2. 围岩拱顶沉降云图

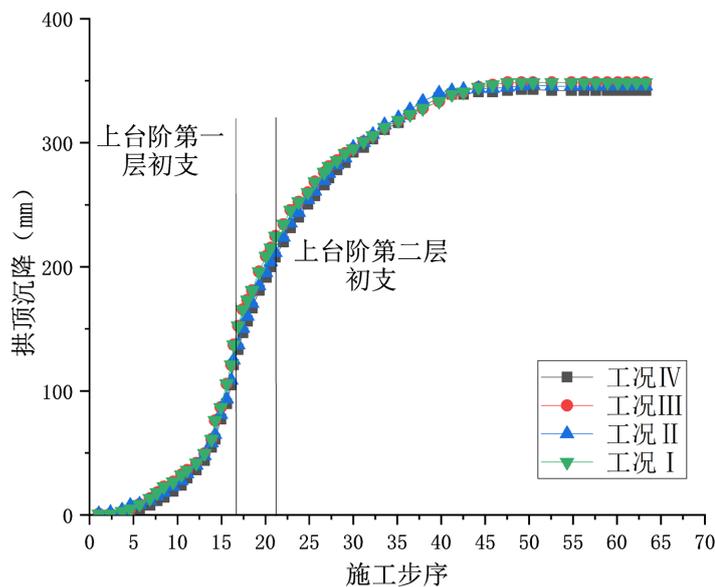


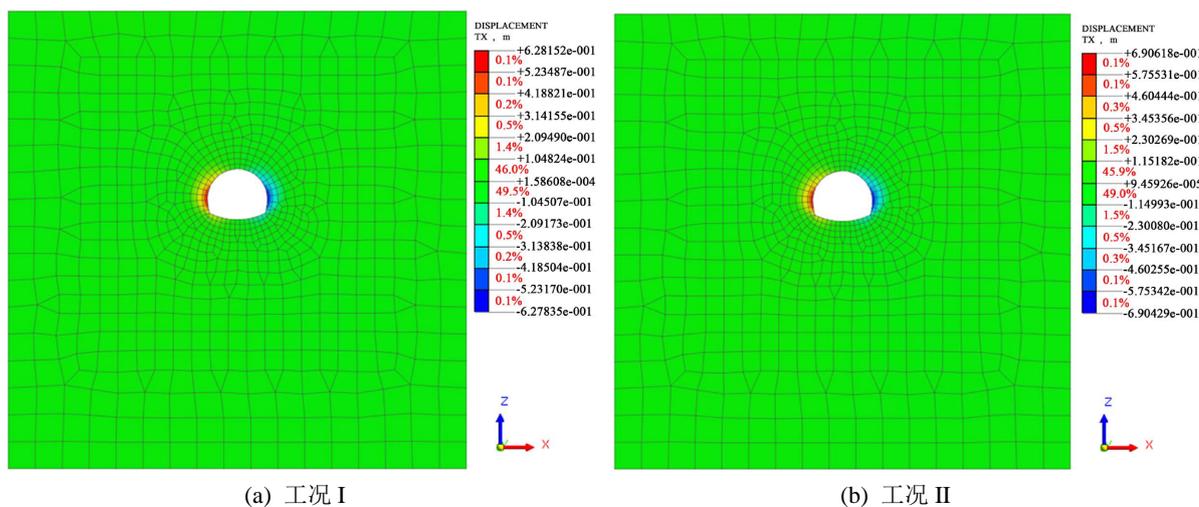
Figure 3. Settlement curve of surrounding rock vault
图 3. 围岩拱顶沉降曲线

分析表 4 可知, 比较四种不同厚度组合下隧道拱顶的最终沉降, 在双层初支总厚度不变条件下, 增大第一层初支厚度能够减小围岩拱顶下沉, 但减小幅度较小。分析以上图表可知, 双层初期支护体系对围岩拱顶沉降的抑制作用不明显。

Table 4. Maximum vault settlement value of surrounding rock
表 4. 围岩最大拱顶沉降值

工况	I	II	III	IV
拱顶沉降值(mm)	343.3	332.0	335.8	328.1

2) 不同厚度组合下双层初支体系的隧道水平收敛
不同工况下隧道水平收敛云图如图 4 和图 5 所示。



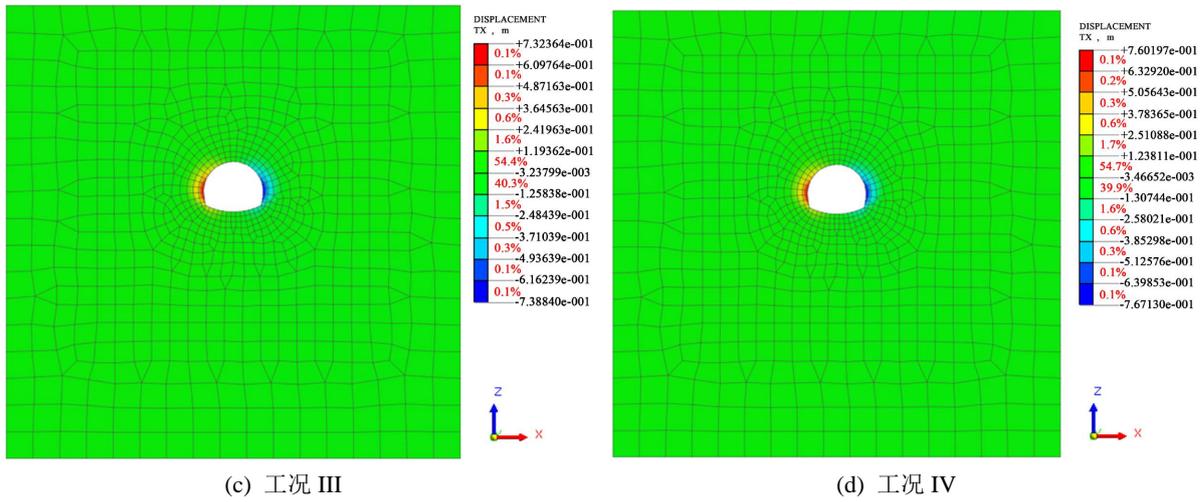


Figure 4. Horizontal convergence cloud diagram of surrounding rock
 图 4. 围岩水平收敛云图

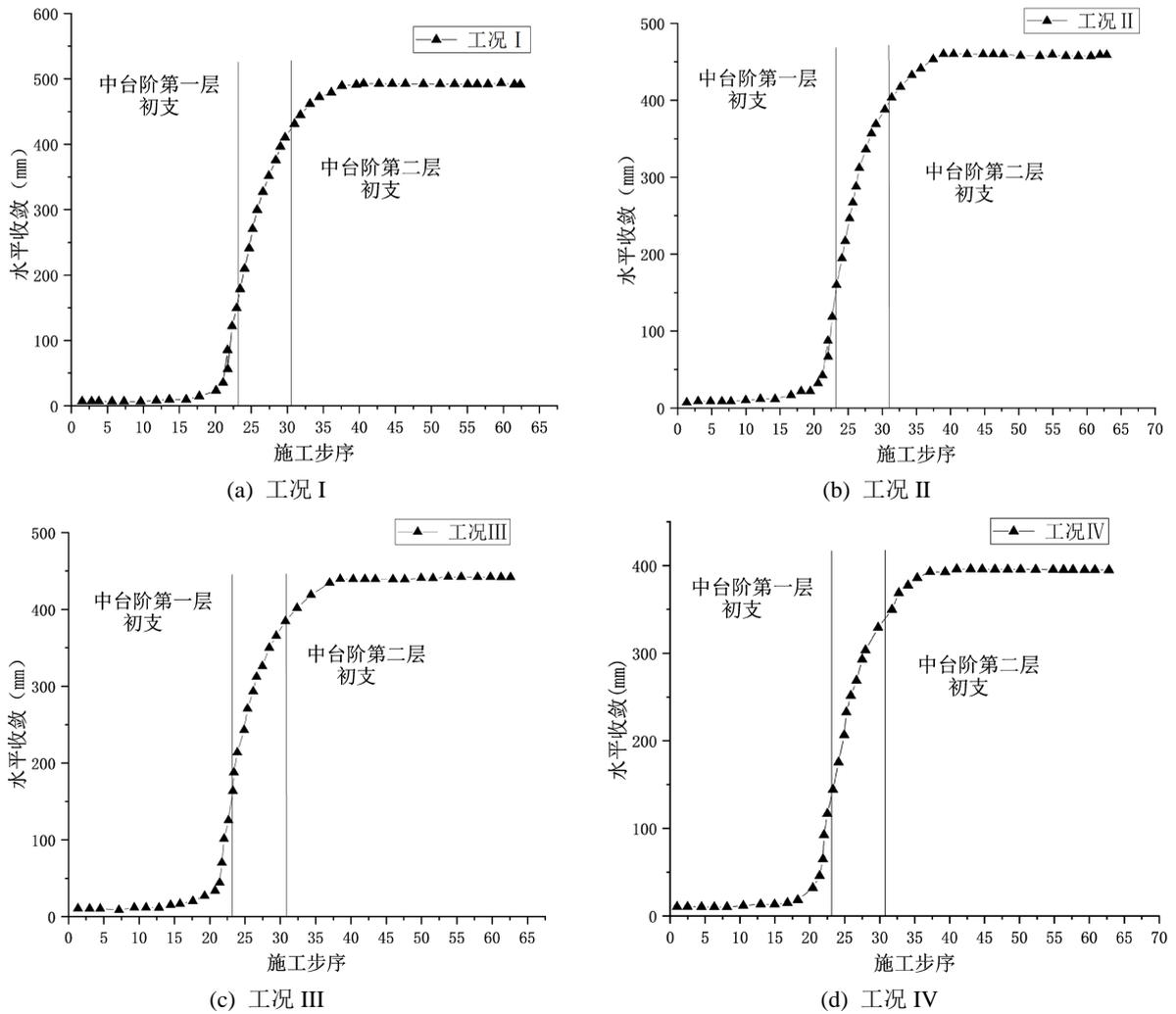


Figure 5. Horizontal convergence curve of surrounding rock
 图 5. 围岩水平收敛曲线

从图 4 和图 5 可以看出, 在四种工况下, 隧道水平收敛的变化规律基本相似。中台阶开挖初期支护施工完成后, 隧道水平收敛变形速率迅速增大, 一段时间后收敛变形速率开始减小。随着中台阶第二层初期支护的施工, 隧道的水平收敛速度进一步降低。仰拱施工完成, 初期支护闭合成环后, 隧道水平收敛趋于稳定。

分析表 5 可得, 在四种工况下, 隧道水平最大水平收敛与最小水平收敛的最大差异值为 139.3 mm, 水平收敛相差 22.1%, 隧道水平收敛差异明显。表明双层初期支护体系对抑制隧道水平收敛有较好的效果, 而隧道水平收敛也随着第一层初支厚度的增加而减小, 说明适当增加第一层初支厚度, 可以有效地减小水平收敛值。比较四种不同厚度组合下隧道水平收敛的最终值, 可以看出, 当第一层初期支护厚度为 40 cm, 第二层初期支护厚度为 15 cm 时, 隧道的水平收敛值最小。但考虑到施工方便和钢拱架的尺寸, 建议选择双层初期支护体系, 第一层初期支护厚度为 35 cm, 第二层初期支护厚度为 20 cm, 既可以缩小水平收敛也保障了施工的可操作性。

Table 5. Maximum horizontal convergence of surrounding rock
表 5. 围岩水平收敛最大值

工况	I	II	III	IV
水平收敛值(mm)	767.1	738.8	690.4	627.8

5. 总结

本文从支护结构控制围岩变形的角度出发, 通过分析双层初期支护体系不同厚度组合对围岩变形的影响, 结合现场实际工程条件, 提出了双层初支体系的施工参数。主要结论如下:

1) 调整施工方法及支护措施后试验段二的拱顶沉降和水平收敛都有较为明显的降低, 且对围岩水平变形控制效果更好, 围岩整体变形量减小 30%左右。

2) 在双层初支体系总厚度不变的条件下, 第一层初支厚度从 25 cm 增到 40 cm 的过程中, 最大水平收敛值减小了 90.3 mm, 缩小了 22.3%, 说明双层初期支护体系对抑制隧道水平收敛有较好的效果。建议现场施工参数第一层初期支护厚度和第二层初期支护厚度分别取 35 cm 和 20 cm。

3) 对于双层初期支护体系, 越早施作第二层初支结构, 对围岩水平方向变形控制效果越好。中台阶开挖前施作第二层初期支护与仰拱开挖前施作水平收敛差为 46 mm, 差异较大。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(11662007); 甘肃省建设科技攻关项目(JK2018-33)。

参考文献

- [1] Guo, X.L., et al. (2021) Research on Support Method in Soft Rock Tunnel Considering the Rheological Characteristics of Rock. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, No. 23. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08635-6>
- [2] 孔超, 张俊儒, 王海彦, 古松, 顾颖, 任松波. 深埋软岩大变形隧道支护变形特征及承载机理研究[J]. *中国铁道科学*, 2021, 42(6): 103-111.
- [3] 陈明福. 高应力软岩单线铁路隧道大变形控制技术研究[J]. *公路*, 2021, 66(11): 369-374.
- [4] Zhou, J. and Yang, X.A. (2021) An Analysis of the Support Loads on Composite Lining of Deep-Buried Tunnels Based on the Hoek-Brown Strength Criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **118**, Article ID: 104174. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104174>
- [5] 刘小俊. 高地应力千枚岩隧道支护体系试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(5): 1472-1478+1528.

- [6] 王万平, 李建斐. 基于主动支护的高预紧力锚索处理高地应力软岩大变形隧道效果分析[J]. 公路, 2021, 66(10): 403-408.
- [7] Guo, P., Fan, J.Q., *et al.* (2021) Numerical Simulation of New Support Structure for High In-situ Stress Tunnel of Sichuan—Tibet Railway. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **861**, Article ID: 032028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/861/3/032028>
- [8] Wang, F.N., Guo, Z.B., *et al.* (2021) Large Deformation Mechanism of Thin-Layered Carbonaceous Slate and Energy Coupling Support Technology of NPR Anchor Cable in Minxian Tunnel: A Case Study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **117**, Article ID: 104151. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104151>