

# 复杂地质条件下软岩隧洞变形特性及处理方法研究

赵武, 冯骏驰, 宋泽斌

(陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 为研究复杂地质条件下软岩隧洞的变形特性及有效处理方法, 以引汉济渭二期工程南干线16#隧洞为依托工程, 通过现场调研、数值模拟与现场监测相结合的方法, 分析了软岩在高地应力、富水等复杂地质环境下的变形机制与时空演化规律。针对隧洞施工中出现的初期支护开裂、围岩收敛过大等问题, 设计了新型复合支护结构体系, 并对不同支护工况下的初支应力及位移进行了对比分析。在此基础上, 提出了针对性的变形处理方案, 通过对支护参数的优化调整, 结合信息化的施工手段, 实现了对隧洞变形的有效控制。研究表明: 所提出的处理方法能够显著改善软岩隧洞的受力状态, 降低围岩变形速率, 确保工程施工安全与长期稳定性。

**关键词:** 隧洞; 高地应力; 富水; 软岩变形; 数值模拟; 处理方法

中图分类号: U452

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0177-07

## Deformation Characteristics and Treatment Methods of Soft Rock Tunnels Under Complex Geological Conditions

ZHAO Wu, FENG Junchi, SONG Zebin

(Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China)

**Abstract:** To analyze the deformation characteristics and effective treatment methods of soft rock tunnels under complex geological conditions, the 16# Tunnel of the South Main Line of the Second Phase of the Hanjiang River to Wei River Water Diversion Project was taken as the supporting project. Through a combination of field research, numerical simulation, and on-site monitoring, the deformation mechanism and spatiotemporal evolution laws of soft rock under complex geological environments such as high geostress and water abundance were analyzed. In response to problems such as initial support cracking and excessive surrounding rock convergence during tunnel construction, a new composite support structure system was designed, and a comparative analysis of the initial support stress and displacement under different support conditions was conducted. Based on this, a targeted deformation treatment plan was proposed. Through optimizing and adjusting the support parameters, combined with information-based construction methods, effective control of tunnel deformation was achieved. The research results show that the proposed treatment methods can significantly improve the stress state of soft rock tunnels, reduce the deformation rate of surrounding rock, ensure the safety and long-term stability of engineering construction.

**Keywords:** tunnel; high ground stress; water abundance; soft rock deformation; numerical simulation; treatment method

在地下工程建设中, 复杂地质软岩变形段的施工一直是行业内的重难点问题。软岩具有强度低、易风化、遇水软化、稳定性差等特点<sup>[1]</sup>, 在施工过程中极易出现围岩大变形、塌方等灾害, 不仅会延误工

程进度, 还会威胁施工人员的生命安全, 因此选取何种方案快速、优质的完成开挖支护作业, 抑制围岩变形就显得尤为重要。针对地下隧洞围岩稳定性, 国内外学者开展了大量研究。

Sun 等<sup>[2]</sup>借助物理模拟试验,探讨了深埋软岩隧洞开挖变形的机理,察觉到掘进进尺与开挖时节理对围岩变形存在一定的影响。Liu 等<sup>[3]</sup>通过对滇中引水工程隧洞开展物理模型试验,发现锚杆支护对浅层围岩的影响显著,且岩体结构会对围岩整体稳定性产生影响的结论。Li 等<sup>[4]</sup>对软岩隧洞开挖后的支护与不支护两种工况开展数值模拟,探讨了在不同时间效应下围岩力学特性及支护参数对隧洞围岩稳定性变化的影响。Xu 等<sup>[5]</sup>通过数值流形方法分析了隧洞支护结构对大挤压变形的控制机理,从而优化了支护时机的选择。在国内,也有不少学者针对围岩稳定性开展研究。蒋昱州等<sup>[6]</sup>通过室内试验分析了不同含水率下软岩的强度衰减规律,揭示了水-岩相互作用对软岩变形的影响机制;在支护技术优化领域,李术才等<sup>[7]</sup>提出了基于时空效应的动态支护理念,通过调整支护时机和参数以适应软岩的流变特性。

然而,由于地质条件的复杂性和软岩变形的多因素耦合特征,单一理论或技术往往难以完全解决工程实际问题。引汉济渭二期工程南干线 16#隧洞穿越秦岭腹地,沿线地质条件极为复杂,主要发育有千枚岩、片岩等软质岩层,部分洞段存在高地应力(最大水平主应力达 25 MPa)与富水(涌水量达 50

$\text{m}^3/\text{h}$ )叠加的不利条件,施工过程中多次出现初期支护混凝土开裂、钢拱架扭曲变形及掌子面前方围岩挤出等现象,常规支护方案难以满足工程需求。为此,以该隧洞为工程背景,系统开展软岩变形特性与处理方法研究,研究结果可为类似复杂地质条件下的软岩隧洞工程提供理论依据与技术支撑。

## 1 工程概况

引汉济渭二期工程南干线黄午隧洞以长隧洞方式穿越秦岭北麓中低山,长 69.422 km,起讫里程为南干 0+033.1—南干 69+455。隧洞进口始自黄池沟配水枢纽,沿线经过秦岭北麓 31 条峪口,洞线大多距秦岭北缘山前断裂(F2)南边界 0.5~1.0 km,隧址区地质条件复杂多样。其中黄午隧洞 16#隧洞全长 3 144 m,里程南干 20+421—南干 23+565,隧洞设计比降为 1/2500,断面为圆拱直墙型,内轮廓尺寸为 5.05 m×6.2 m。该施工段位于秦岭北麓中低山区,最大埋深约 378 m,最小埋深约 32 m。隧址区发育 3 条断层破碎带,2 条不整合接触带,断层带岩体破碎,地下水发育,易突泥、涌水、洞顶坍塌,是全线重难点控制性工程,黄午隧洞平面布置示意图见图 1。



图 1 黄午隧洞平面布置示意图

## 2 软岩隧洞初支应力及位移分析

### 2.1 研究方法 及 内容

复杂地质软岩变形隧洞施工工法工艺原理是:首先通过超前地质预报对掌子面前方及周边地质进行探究,结合设计图纸,快速获取掌子面周边围岩状

况,数据收集完成后采用有限元数值模拟计算,选择优化后的支护结构断面形式及支护参数进行开挖后的初期支护工作,支护完成后采用地层-结构法对隧洞初期支护有限元模拟计算,在满足变形协调条件的前提下分别计算结构与地层的内力<sup>[8]</sup>,并据此验算地层的稳定性和进行构件截面设计,根据反馈

结果,进一步优化支护参数,指导下一步施工,形成闭环式管理,与传统强支护+径向注浆的工法相比,施工安全性高,周期短,人员投入少,节约材料。

## 2.2 工艺原理

有限元数值模拟计算确定新型抗变支护结构并施作方面:根据超前地质预报成果,采用地层-结构法对隧洞初期支护有限元模拟计算,将原设计圆拱直墙断面支护结构与优化为圆拱曲墙(弧形仰拱)支护断面结构,将钢架型号及间距由原设计I16/0.8 m,优化为I20a/0.8 m,将原设计的径向注浆加固,调整为纵向连接型钢(型号:I20a型钢)+边墙Φ89锁脚锚管注浆的支护形式,同时边墙及仰拱增设泄水孔降低地下水压力。

监控量测成果快速检测反馈修正支护参数方面:通过隧洞监控量测、断面扫描相结合准确收集初支变形规律,调整上台阶拱架外撇宽度,初支预留变形量,各工序施工时机等,通过对钢拱架应力的监测,有效收集支护完成后拱架受力情况,指导后续施工。

## 2.3 新型支护结构体系设计

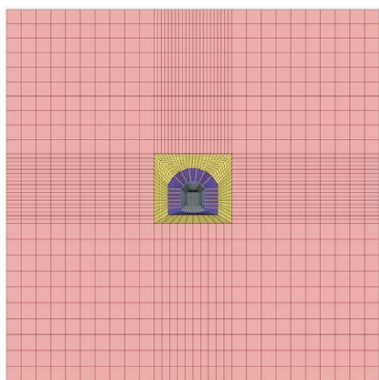
(1) 16号隧洞软岩变形段新型支护结构体系设计:采用地层-结构法对隧洞初期支护有限元模拟计算,其原理是将初期支护和周边围岩视为一个整体,使其在满足变形协调条件下,分别计算初期支护与周边围岩的内力,并以此验算围岩的稳定性,根据围岩稳定性动态调整各项支护参数<sup>[9]</sup>。计算采

用midas GTSNX 有限元分析软件对初期支护和地层进行建模,计算隧洞开挖后初期支护的受力,得到初支单元内力后进行结构验算<sup>[10]</sup>。计算建模采用2D模型,并用荷载释放系数控制围岩和初期支护的荷载承载比例。

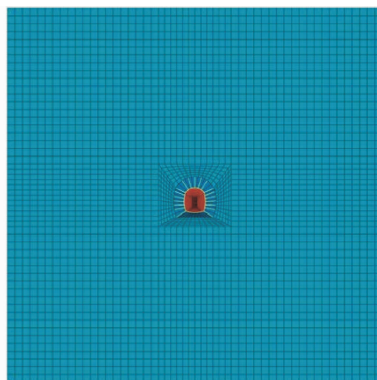
参考相关规范,对于荷载释放系数,初步设计阶段V类围岩取值如下:开挖阶段围岩承载0.1,初支施作阶段承载0.3。本变更报告计算时,对开挖阶段围岩承载调整为0.05,初支施作阶段承载调整为0.35。按弹塑性理论采用数值计算方法分析支护前后围岩的变形,围岩变形、应力采用摩尔-库伦本构模型进行分析<sup>[11]</sup>,喷护及衬砌采用线弹性本构模型进行分析<sup>[12]</sup>。计算模型使用平面应变单元模拟地层,用梁单元模拟初期支护喷层,用桁架单元模拟锚杆<sup>[13]</sup>。计算过程中通过删除或添加相关单元模拟不同类型围岩中隧洞开挖及支护施工过程。根据初步设计及现阶段软岩变形处理方案,采用软岩地层参数,拟定3种不同工况进行有限元分析计算,计算工况见表1。建立计算模型见图2。

表1 数值模拟计算工况

计算工况	工况1	工况2	工况3
断面形式	圆拱直墙	圆拱直墙	圆拱曲墙
喷层厚度/部位	0.2 m/全断面	0.25 m/全断面	0.2 m/全断面
钢架型号/间距	I16/0.8 m	I20a/0.8 m	I20a/0.8 m



(a) 圆拱直墙断面



(b) 圆拱曲墙断面

图2 圆拱断面计算模型

(2) 数值模拟计算成果使用midas GTSNX有限元分析软件,对上述3种工况下的隧洞初期支护受力进行分析,计算结果如下:

### 1) 工况1

计算结果显示,工况1圆拱直墙断面初期支护结构的喷层轴力、喷层弯矩、锚杆轴力均受压,轴力

最大在拱肩处,最大轴力为1 067.51 kN,弯矩最大在底板处,最大弯矩为-40.09 kN·m,底板安全系数为1.19,边墙安全系数为1.55,底板和边墙安全系数均不满足设计安全系数1.8的要求,该支护结构不可行,初支内力图见图3。

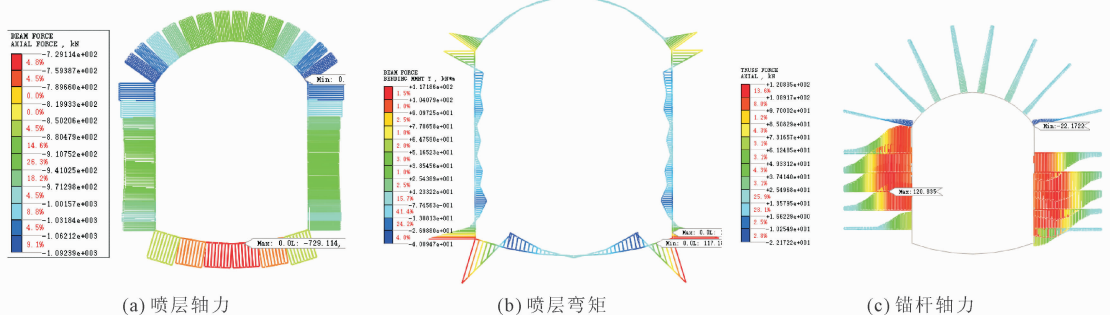


图 3 工况 1 圆拱直墙断面初支内力图

### 2) 工况 2

计算结果显示,喷层轴力、弯矩及锚杆轴力相较于工况 1 均有不同程度的变化。拱肩处最大轴力为 1 289.36 kN,较工况 1 有所增大,这主要是由于钢架强度提升后,结构整体承载能力增强,承担了更多的围岩压力。底板处最大弯矩为 -32.75 kN·m,相较于工况 1 的 -40.09 kN·m 有所减小,说明增加喷层厚度和提高钢架型号对改善底板受力情况有

一定效果。底板安全系数提升至 1.42,边墙安全系数提升至 1.73,虽然较工况 1 有明显改善,但底板安全系数 1.42 仍未达到 1.8 的设计要求,边墙安全系数 1.73 也略低于设计值,表明单纯通过增加喷层厚度和提高钢架型号,在圆拱直墙断面形式下,仍难以完全满足复杂软岩变形段的支护安全需求。该支护结构不可行,初支内力见图 4。

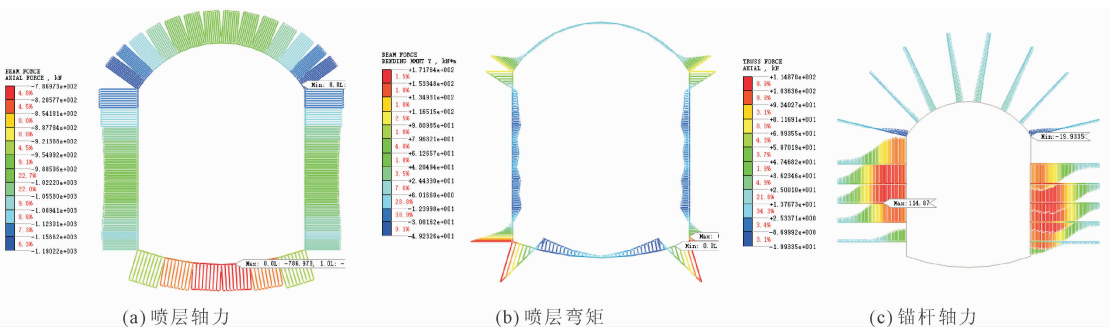


图 4 工况 2 圆拱直墙断面初支内力图

### 3) 工况 3

计算结果显示,工况 3 圆拱曲墙断面初期支护结构的喷层轴力、喷层弯矩、锚杆轴力均受压,轴力最大在边墙处,最大轴力为 -1 175.94 kN,弯矩最大在拱肩处,最大弯矩为 38.44 kN·m,安全系数满足设计安全系数 1.8 的要求,其中边墙安全系数提升至 2.15,底板安全系数达到 2.08,均显著高于设

计标准。从内力分布来看,圆拱曲墙断面相较于前两种工况,应力传递更为均匀,避免了直墙结构在底板与边墙连接处的应力集中现象。锚杆轴力最大值为 -85.62 kN,分布较为合理,能够有效发挥其锚固作用,与钢架、喷层形成协同受力体系。该支护结构可行,初支内力见图 5。

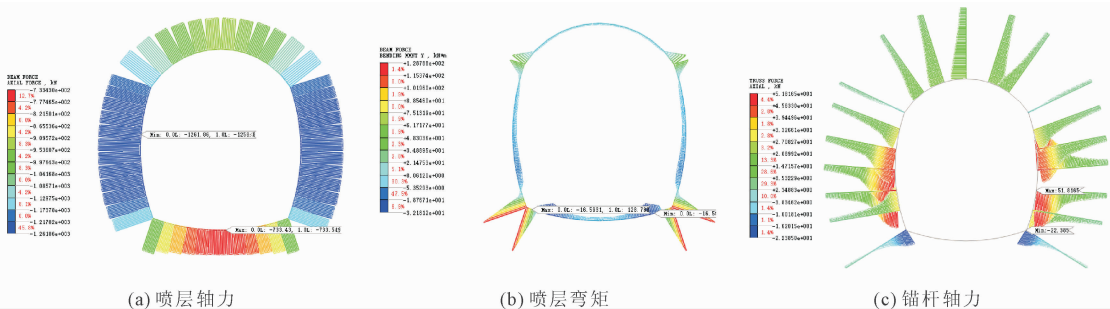


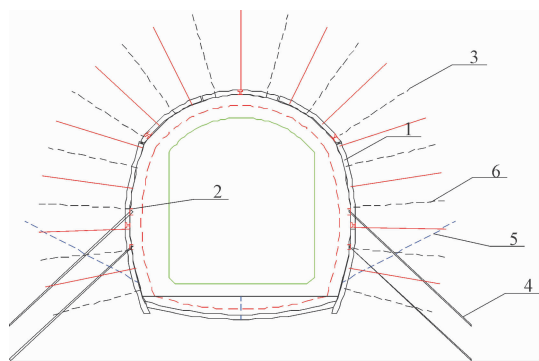
图 5 工况 3 圆拱曲墙断面初支内力图

结合数值模拟结果,工况3所采用的圆拱曲墙断面、I20a型钢架(间距0.8m)、0.2m全断面喷层及增设纵向连接型钢与锁脚锚管的支护组合,能够充分适应16号隧洞软岩变形段的地质条件,为后续施工提供了可靠的理论依据。

### 3 软岩变形处理方案及监测效果分析

#### 3.1 处理方案及支护参数

隧洞两侧拱肩和底板处安全系数偏低,仍存在变形、坍塌的安全风险。为进一步提升安全系数,在薄弱处拱顶、两侧拱肩、两侧边墙中部拱架之间增加5道纵向连接型钢(型号:I20a型钢),在两侧边墙连接槽钢处各增设2根 $\Phi 89$ 锁脚锚管注浆(注浆压力:0.3~0.5 MPa),单根长度6 m。考虑到软岩段围岩遇水易软化,受地下水影响严重,掌子面设置超前泄水孔3处,长度30 m,提前引排掌子面前方地下水。边墙两侧、仰拱中心位置每2榀拱架增加1根4.5 m长 $\phi 50$ 泄水孔。隧洞开挖预留变形量按40 cm考虑,并结合安全监测的结果进行动态调整。其余支护措施维持V a型支护衬砌参数不变,包括:拱墙设 $\Phi 22$ 砂浆锚杆,长3.5 m,间距120 cm $\times$ 100 cm;拱墙挂 $\Phi 8$ 钢筋网,间距20 cm $\times$ 20 cm;二次衬砌配筋不变。通过泄水孔的布置和局部支护参数的加强,能够有效减少地下水对岩体的影响,有效抑制了开挖期间支护变形,并确保施工及通水后结构的安全稳定。支护结构系统见图6。



注:1为I20a拱形架;2为I20a纵向连接槽钢;3为 $\Phi 22$ 纵向连接筋;4为 $\Phi 89$ 锁脚;5为边墙及仰拱底部 $\phi 50$ 泄水孔;6为 $\Phi 22$ 砂浆锚杆

图6 新型支护结构系统示意图

#### 3.2 变形处理监测效果分析

考虑到中小断面隧洞施工过程中监控量测点易破坏,且软岩变形在开挖完成至支护完成期间变形交大,常规单一的监控量测点测量形式,宜被干扰,造成偏差,因此项目建立隧洞监控量测+断面扫描

+长期安全监测相结合的初支变形数据分析体系<sup>[14]</sup>,通过隧洞监控量测+断面扫描组合的形式,验证监测成果准确性,更加高效准确的形成监控量测成果,指导现场调整开挖预留变形量、上台阶钢架外撤量、下台阶实施时间、仰拱封闭时间,同时初支出现异常时,及时调整支护措施,如拱架加密或拱架加大,隧洞监控量测曲线图见图7。

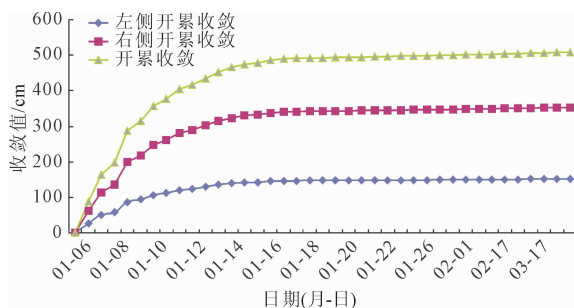


图7 隧洞监控量测曲线图

通过监控量测数据分析,得到南干22+975段隧洞上台阶的收敛值变化规律,利用该方案处理软岩隧洞变形段,隧洞左侧收敛值在仰拱封闭后趋于稳定,收敛值为14.4 cm,隧洞右侧收敛值在仰拱封闭后趋于稳定,收敛值为35.7 cm,累计收敛值仅为50.1 cm,变形速率最大发生在开挖后72 h内,随后沉降速率逐渐减缓,至仰拱封闭后3 d基本稳定,日均收敛值小于0.5 mm,满足设计对结构稳定性的要求。同时喷混凝土未出现开裂现,验证了纵向连接型钢与锁脚锚管共同作用下,支护结构整体受力性能得到显著提升,该变形处理方案能够有效控制软岩隧洞的变形发展,确保施工过程中的结构安全与稳定。

进一步分析断面扫描数据可知,优化后的支护结构在空间形态上与设计轮廓贴合度较高,未出现因变形过大导致的侵限问题<sup>[15]</sup>。以典型断面为例,扫描结果显示针对软岩变形段支护完成后长期徐变的特征,现场在围岩内部变形监测在施工异常段落进行安全监测,主要包括多点位移计、渗压计、钢板应力计监测。三点式位移计特征值见表2,渗压计特征值见表3,钢板应力计特征值见表4。

由表2三点位移计特征值表可以看出:黄午隧洞南干22+975断面围岩内部位移微小,目前位移量在-1.35~1.2 mm之间,各测点变幅均较小,最大变幅为1.28 mm(左边墙测点BX-HWII-8-1-2),表明围岩内部处于相对稳定状态,未出现明显的塑性变形或松动现象,这说明优化后的支护结构能够

有效约束围岩的变形,传递和分散围岩压力,从而控制了围岩向洞内的收敛。

表 2 黄午隧洞 22+975 断面位移值 单位:mm

序号	测点编号	安装位置	最大值	最小值	变幅	最新测值
1	BX-HWII-8-1-1	左边墙	1.08	1.06	0.02	1.06
2	BX-HWII-8-1-2	左边墙	-0.07	-1.35	1.28	-1.35
3	BX-HWII-8-1-3	左边墙	0.66	-0.11	0.78	-0.11
4	BX-HWII-8-2-1	拱顶左侧	1.20	0.75	0.45	1.20
5	BX-HWII-8-2-2	拱顶左侧	0.31	0.24	0.07	0.31
6	BX-HWII-8-2-3	拱顶左侧	0.99	0.55	0.44	0.99
7	BX-HWII-8-3-1	拱顶	0.05	0.01	0.04	0.04
8	BX-HWII-8-3-2	拱顶	-0.10	-0.14	0.05	-0.14
9	BX-HWII-8-3-3	拱顶	-0.02	-0.05	0.03	-0.02
10	BX-HWII-8-4-1	拱顶左右侧	0.26	0.22	0.04	0.24
11	BX-HWII-8-4-2	拱顶左右侧	0.12	0.11	0.01	0.11
12	BX-HWII-8-4-3	拱顶左右侧	0.26	0.24	0.02	0.24
13	BX-HWII-8-5-1	右边墙	0.84	0.68	0.16	0.84
14	BX-HWII-8-5-2	右边墙	0.06	0.04	0.03	0.04
15	BX-HWII-8-5-3	右边墙	0.42	0.30	0.12	0.42

表 3 黄午隧洞 22+975 断面渗压值 单位:m

序号	测点编号	安装位置	最大值	最新测值
1	P-HW II-8-1	左边墙	0.00	0
2	P-HW II-8-2	右边墙	0.05	0
3	P-HW II-8-3	断面底板	1.22	0

从表 3 渗压计监测数据来看,隧洞外水压力值整体较低,最大值为 0.10 MPa(底板测点 SY-HWII-8-3),且各测点压力值变幅较小,均在 0.06~0.07 MPa 之间,最新测值稳定在较低水平。这一结果表明,通过掌子面超前泄水孔和边墙、仰拱底部泄水孔的联合作用,有效降低了隧洞周围的地下水压力,减少了水对软岩的软化作用,从而避免了因水压过大导致的支护结构附加荷载增加和围岩强度降低的问题,为支护结构的稳定提供了有利条件。

表 4 黄午隧洞 22+975 断面钢板应力值 单位:MPa

序号	测点编号	安装位置	最大值	最小值	变幅	最新测值
1	GB-HWII-8-1	左边墙	-50.44	-52.77	2.33	-50.50
2	GB-HWII-8-2	左拱脚	-49.26	-56.54	7.27	-56.54
3	GB-HWII-8-3	拱顶	-88.96	-117.45	28.50	-117.45
4	GB-HWII-8-4	右拱脚	-88.34	-91.82	3.48	-91.82
5	GB-HWII-8-5	右边墙	-7.59	-9.60	2.01	-9.41

分析表 4 钢板应力计特征值统计数据可以看出,钢板应力随时间推移逐渐趋于稳定,未出现持续

增长的情况,表明支护结构整体受力状态良好,能够长期维持隧洞的稳定。综合监控量测、断面扫描及长期安全监测的各项数据,所采用的变形处理方案在控制软岩隧洞变形、保障结构安全方面取得了显著成效。

## 4 结 论

以复杂地质条件下的软岩隧洞为研究对象,通过数值模拟与现场监测相结合的方法,系统分析了不同支护结构方案的受力特性与变形控制效果。主要结论如下:

(1) 采用圆拱曲墙断面形式,配合 I20a 型钢架(间距 0.8 m)、0.2 m 全断面喷层,并增设纵向连接型钢与锁脚锚管的新型支护结构体系,能够有效改善软岩隧洞的受力状态,显著提高支护结构的安全系数,使其满足设计要求。

(2) 通过在隧洞薄弱部位加强支护、设置超前泄水孔及边墙、仰拱泄水孔等处理方案,有效降低了地下水对软岩的不利影响,并结合隧洞监控量测、断面扫描与长期安全监测相结合的数据分析体系,实现了对软岩隧洞变形的动态控制。

(3) 现场监测数据显示,隧洞收敛值、围岩内部位移、渗压及钢板应力均处于稳定状态,验证了所提出支护结构及处理方案的合理性与有效性。

## 参考文献:

- [1] 王才品,周 勇,魏 桦,等. 深埋软岩水工隧洞开挖支护设计及工程对策[J]. 大坝与安全,2021(03):32-38.
- [2] Sun Xiaoming, Chen Feng, Miao Chengyu, et al. Physical modeling of deformation failure mechanism of surrounding rocks for the deep-buried tunnel in soft rock strata during the excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,74:247-261.
- [3] Liu Keyuan, Yang Xiaojie, Tao Zhigang, et al. Study on deformation mechanism of soft rock tunnel under seepage and mechanical response of prestressed anchor cable[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025,58(05):5299-5328.
- [4] Li Yong, Deng Fei, Zheng Jing, et al. Study on the support strategy of NPR cable truss structure in large deformation soft rock tunnel across multistage faults[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024,57(12):11261-11281.
- [5] Xu Xiangyu, Wu Zhijun, Liu Quansheng. An improved numerical manifold method for investigating the mech an-

- ism of tunnel supports to prevent large squeezing deformation hazards in deep tunnels[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 151:104941.
- [6] 蒋昱州,朱杰兵,王瑞红. 软硬互层岩体卸荷蠕变力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(04):778-784.
- [7] 李利平,李术才,赵勇,等. 超大断面隧道软弱破碎围岩空间变形机制与荷载释放演化规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(10):2109-2118.
- [8] 李映萍. 软岩地层围岩蠕变对输水隧洞安全性的影响研究[J]. *水利科技与经济*, 2023, 29(02):30-33.
- [9] 段汝健,胡香伟. 高地应力地区地下洞室施工的几个问题探讨[J]. *云南水力发电*, 2010, 26(05):129-133, 138.
- [10] 杨硕. 深部复合地层 TBM 隧道支护作用机理与稳定控制研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
- [11] 刘泽毅. 水工隧洞变形特征及支护效果分析[J]. *水利技术监督*, 2024(03):115-118.
- [12] 杨建新. 输水隧洞旁通洞变形控制与支护优化研究[J]. *黑龙江水利科技*, 2025, 53(04):140-142.
- [13] 郝浩. 滇中引水工程江底河组粉砂质泥岩工程地质特性及对隧洞进口段围岩稳定性的影响分析[D]. 成都:成都理工大学,2020.
- [14] 安普太. 水工隧洞内径对软岩稳定性影响分析研究[J]. *陕西水利*, 2024(07):146-149.
- [15] 张茂础,颜天佑,张国强,等. 深埋隧洞软岩力学特性与合理参数取值研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(S1):3217-3228.

~~~~~  
 (上接第 162 页)

- [11] 齐东春,李伟东,赵志国. 考虑边界条件影响的锚跨索股频率法索力识别研究[J/OL]. *重庆大学学报*, 1-13 [2026-05-03]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1044.N.20240701.1511.005>.
- [12] Geuzaine M, Foti F, Denoël V. Minimal requirements for the vibration-based identification of the axial force, the bending stiffness and the flexural boundary conditions in cables[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 511:116326.
- [13] 徐文城,李娜,谢旭. 考虑边界影响的在役短钢索张力测试研究[J]. *公路*, 2021, 66(05):136-141.
- [14] 赵凯,樊建房. 基于粒子群算法的斜拉桥恒载索力优化[J]. *山东交通学院学报*, 2020, 28(03):48-55.
- [15] 蔡傲,张宇航,王林柯,等. 自适应粒子群算法在成桥索力优化中的应用[J]. *公路交通科技*, 2022, 39(01):81-87.
- [16] 陈志军,刘洋,杨立飞,等. 基于粒子群优化算法的独塔斜拉桥成桥索力优化[J]. *桥梁建设*, 2016, 46(03):40-44.
- [17] 徐宙元,程振清,孙胜,等. 基于混合智能算法的斜拉桥施工索力容差区间优化及应用[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2026, 47(01):114-122.