

# 隧道初期支护力学行为研究

葛 欣

中国五冶集团有限公司 成都 610063

**摘要:** 研究隧道初期支护结构受荷及变形情况, 并进行时空效应分析, 对隧道设计及现场施工具有一定的指导意义。通过现场埋设监测元件, 研究了隧道初期支护变形、围岩与钢拱架间接触压力、钢拱架内力演化规律, 结果表明: (1) 采用台阶法施工时, 下台阶开挖是隧道施工控制的重点阶段。应及时浇筑仰拱, 使初支尽早封闭成环, 以减缓初支变形, 抑制内力发展; (2) 相较初支变形, 围岩与拱架间接触压力、拱架轴力、拱架弯矩表现出力的稳定滞后现象; (3) 围岩与拱架间接触压力及拱架内力沿断面分布不均, 两侧不对称。左、右两洞平行开挖时, 同一断面紧邻侧接触压力较大。钢拱架大部分偏心受拉, 局部偏心受压。拱架弯矩随时间增长存在正、负号转换现象。  
**关键词:** 隧道; 初期支护; 接触压力; 钢拱架轴力; 钢拱架弯矩

## 引言

由于隧道施工时地质条件复杂性和不确定性, 隧道塌方等事故时有发生, 因此对隧道围岩及支护结构的应力监测、研究十分必要。廖伟等<sup>[1]</sup>采用数值模拟结合工程实测的方法研究隧道初期支护钢拱架的应力分布规律; 文竞舟等<sup>[2]</sup>将监控量测数据作为基本参数, 运用地基曲梁相关理论和反分析法推导出初期支护内力解析式, 得到了初期支护内力分布; 曲直<sup>[3]</sup>通过现场监测钢拱架内外侧翼缘应力计算出钢拱架内力, 进行支护结构稳定性预判研究; 黄宏伟等<sup>[4]</sup>研究了围岩及初期支护变形随开挖进度及时间变化的规律; 杨志浩等<sup>[5]</sup>通过室内模型试验研究了公路隧道下穿倾斜煤层采空区附近地层的移动和初期支护的内力; 陈锦涛等<sup>[6]</sup>通过现场监测, 较为系统地研究了隧道支护结构内力分布规律; 来弘鹏等<sup>[7]</sup>通过现场测试, 对围岩与初期支护接触压力、初期支护与二次衬砌接触压力及二次衬砌结构应力进行了研究; 胡江春等<sup>[8]</sup>通过有限元分析软件 SAP2000 建立钢拱架模型, 探究偏压隧道不均匀来压对钢拱架应力的影响机理。

通过现场监测, 研究了隧道初期支护变形、围岩与钢拱架间接触压力、钢拱架内力时空效应的演化规律, 对隧道设计及现场施工给予一定的指导意义。

## 1 工程概况

本标段隧道工程线路走向由南向北延伸, 隧道左线起讫桩号: LK0+860-LK2+626.322, 长 1766.32 m。隧道右线起讫桩号: RK0+860-RK2+614.840, 长 1754.84 m。左右线除 L(R)K0+860-L(R)K1+070 为 1.5%上坡外, 其余里程直至接入工作井内均为下坡。左、右线隧道南端洞口为双向六车道小净距形式, 进口洞门类型采用削竹式, 以矿山形式穿越山体向北逐渐过渡到分离式, 通过分岔口分离出 Z1、Z2 匝道后为双向四车道分离式, 通过不同纵坡, 左、右线过渡至竖向小净距形式, 继续向北过渡至竖向叠层形式并接入工作井。Z1、Z2 匝道全程通过 6%上坡爬升到主线上部后接入工作井。

隧道洞室地下水主要为基岩裂隙水, 局部由于断层发育, 断层、裂隙连通性好, 地下水主要接受大气降水及山坡上部地下水体的下渗补给。

## 2 监测方案

### 2.1 监测原理

采用振弦式压力盒进行围岩与钢拱架间接触压力量测, 在微微振荡条件下, 通过采集钢弦的自振频率, 换算出应力。测试元件选择 CD-2021 振弦式土压力计, 见图 1。

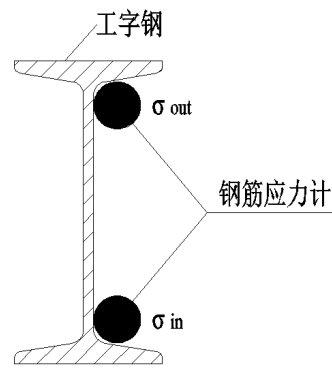
钢架内力测试元件选择 GYL 钢筋应力计, 焊接在工字钢两侧翼缘(见图 2), 每处布置 2 个, 与工字钢一同变形, 以此获取拱架轴向应力。



图 1 土压力盒布置图



(a) 实物图



(b) 示意图

图 2 钢筋应力计布置图

### 2.2 监测断面选择

监测点宜选择布置在受力较复杂及有代表性的隧道洞壁上, 因此分别选择 LK1+180、RK1+180 (吉大断裂构造破碎带) 2 个三车道断面, 为便于行文, 下文中 LK1+180、RK1+180 均以 ZD 和 YD 表示。

ZD 和 YD 围岩洞身主要为微风化花岗岩及吉大断裂构造破碎带穿过, 节理裂隙较发育, 岩体较破碎, 局部破碎, 呈块石、碎石状镶嵌结构或呈碎石状压碎结构。围岩级别为 IV 级, 采用两台阶法施工, 支护类型为 S4a, 见下表 1。

表1 S4a 支护类型

支护结构	规格	间距
超前小导管	Φ42 × 4 mm (L=4 m)	40 cm × 3 m (环向 × 纵向)
系统锚杆	D25 中空注浆锚杆 (L=3.5 m)	1 m × 1 m (环向 × 纵向)
钢拱架	I18 (Q235)	1 m
钢筋网	Φ8 单层	20 cm × 20 cm
喷射混凝土	C25	24 cm
二次衬砌	C35-P8	45 cm

注: 预留变形量10cm。

2.3 监测点布设

不同种类的测试元件尽量布设在同一断面的同一位置, 以使结果相互印证。于拱顶布置3处变形监测点 J1、J2、J3, 用以测量拱顶下沉, J4 测量拱腰水平收敛。分别于拱顶、左拱腰、右拱腰、左拱脚、右拱脚布设5处监测点, 用以量测围岩与拱架间接触压力、拱架内力, 见图3。

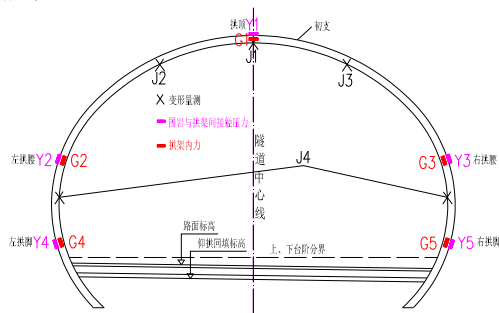


图3 两台阶断面监测点布设

3 实测数据分析

3.1 初期支护变形

拱顶以“+”表示上升,“-”表示下沉;净空变化以“+”表示向外扩张,“-”表示洞内收敛。

从图4可以看出,隧道上台阶开挖并支护后,随着时间的增长,拱顶下沉及水平收敛变形增速较快,经过约20天的应力重分布后,变形趋于稳定。于8月3日下台阶开挖并支护后,变形继续增大,其中水平收敛相较拱顶下沉变形显著,同样,应力释放一定时间后,变形基本不再增加。9月6日进行仰拱浇筑,变形稳定。观察图5,表现类似的变化规律。结合图4、图5,拱顶下沉最大值一般发生在偏离拱顶一定位置处。ZD断面拱顶下沉最大值为10 mm,水平收敛值为5 mm,均小于累计变化量控制指标20 mm的要求;YD断面拱顶下沉最大值为7 mm,水平收敛值为5 mm,均小于累计变化量控制指标20 mm的要求。无论是ZD断面,还是YD断面,拱顶下沉日变化速率均小于3 mm/d的控制指标,水平收敛日变化速率均小于2 mm/d的控制指标。

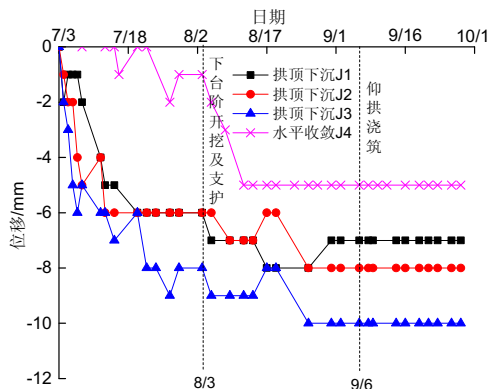


图4 ZD 拱顶下沉及水平收敛

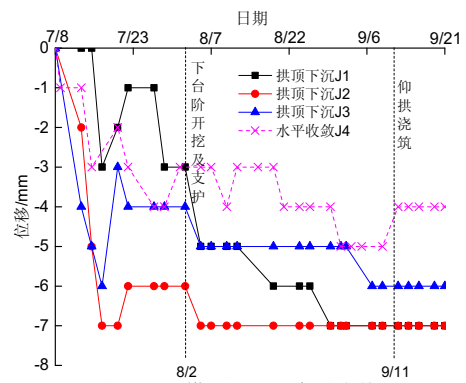


图5 YD 拱顶下沉及水平收敛

3.2 围岩与拱架间接触压力

从图6可以看出,下台阶施工前,随着时间增长,围岩与拱架间接触压力增速较快,下台阶施工后,接触压力增速较小。相较初支变形而言,接触压力表现出力的稳定滞后现象。YD断面接触压力初始采集值较小,这跟喷射混凝土密实度及土压力盒埋设有关。

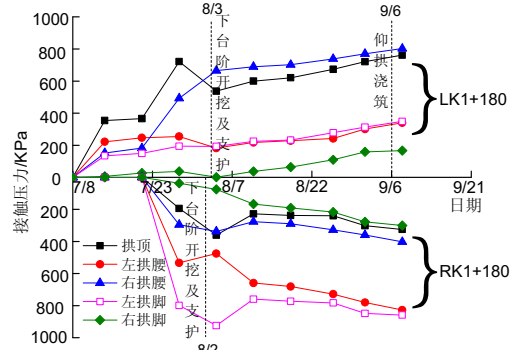


图6 围岩与拱架接触压力

分别选取8月11日和9月8日左、右洞的接触压力,见图7,可以发现,围岩与拱架间接触压力沿断面分布不均,两侧不对称,这说明初期支护承受了一定的偏压作用。

分析图7(a)发现,拱顶及右拱腰接触压力较大,分别从8月11日的599.7 kPa、689.5 kPa增长为9月8日的761.9 kPa、802.3 kPa。右拱脚接触压力最小,8月11日为36.7 kPa,9月8日为166.9 kPa。分析图7(b)发现,左拱腰及左拱脚接触压力较大,分别从8月11日的658.8 kPa、759.5 kPa增长为9月8日的826.8 kPa、858.5 kPa。

对比图7(a)、(b)发现,两断面紧邻侧接触压力较大,两断面平面距离3B(B为隧道开挖断面的宽度),这是断面开挖后相互影响的结果。还能发现,随时间推移,断面不同部位接触压力增长均匀。

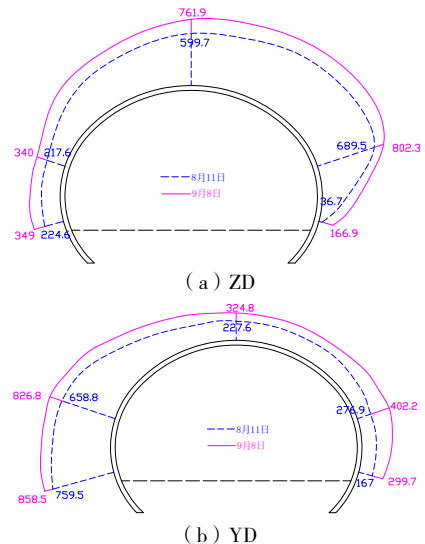


图7 接触压力分布图/kPa

### 3.3 钢拱架内力

通过现场量测,可得到工字钢两侧翼缘的应力 $\sigma_{in}$ 、 $\sigma_{out}$ ,可认为工字钢横截面上应力在 $\sigma_{in}$ 、 $\sigma_{out}$ 间呈线性分布,并假定钢架处于弹性工作状态且不考虑工字钢腹板部位喷射混凝土受力,根据材料力学相关理论可计算工字钢的内力,见公式(1)、(2)。

$$F_N = \frac{(\sigma_{in} + \sigma_{out})}{2} A \quad (1)$$

$$M = \frac{(\sigma_{in} - \sigma_{out})}{h} I \quad (2)$$

式中: $\sigma_{in}$ 、 $\sigma_{out}$ 为钢拱架内、外翼缘实测应力值, kPa;  $F_N$ 为钢拱架轴力计算值, kN;  $M$ 为钢拱架弯矩计算值, kN·m;  $A$ 为钢拱架横截面积,  $m^2$ ;  $I$ 为钢拱架惯性矩,  $m^4$ ;  $h$ 为工字钢截面高度, m。规定轴力受拉为正, 受压为负; 弯矩以洞内侧受拉为正。

#### 3.3.1 钢拱架轴力

从图8、图9可以看出,钢拱架轴力主要为拉力,仅在拱腰等较少部位出现压力,表明拱架大部分受拉。随时间增长,拱架轴力逐渐增大。下台阶开挖并支护后,轴力增速变大,当仰拱浇筑后,轴力增速变缓。较初支变形而言,拱架轴力表现出力的稳定滞后现象。

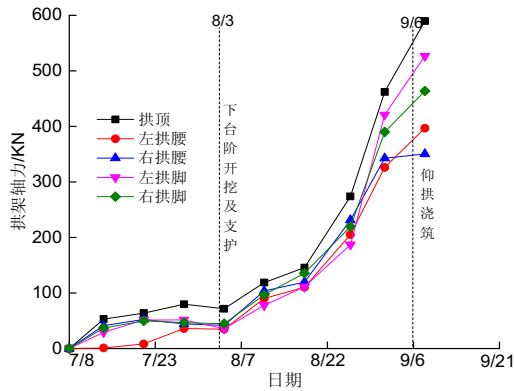


图8 ZD拱架轴力

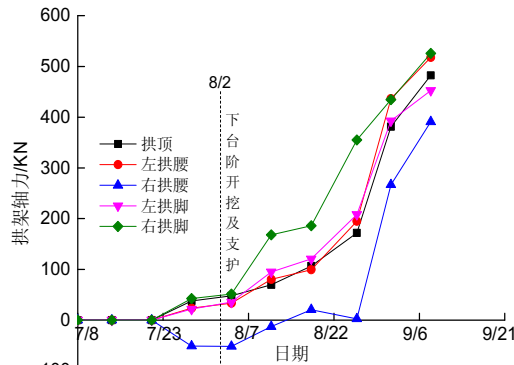


图9 YD拱架轴力

断面钢架轴力分布图见图10,可以看出,轴力沿断面分布不均,两侧不对称。分析图10(a)可知,拱顶处轴力最大,轴力为118.8 kN(8月11日)、589.7 kN(9月8日)。分析图10(b),8月11日右拱腰轴力出现负值,为-12.6 kN,表明拱架局部受压。

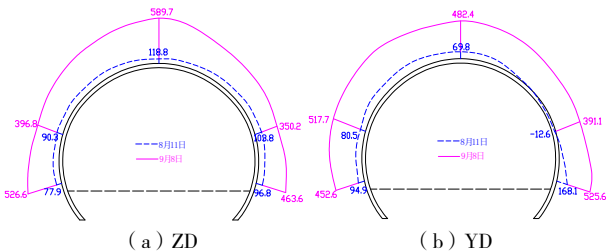


图10 钢架轴力分布图/kN

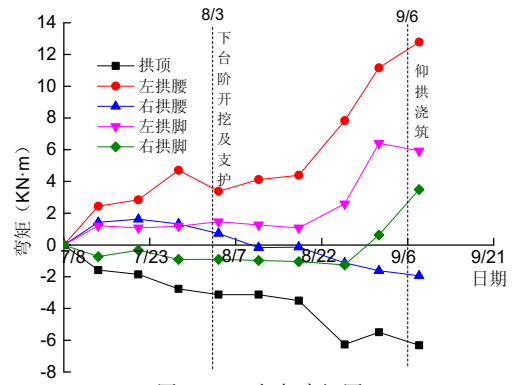


图11 ZD钢架弯矩图

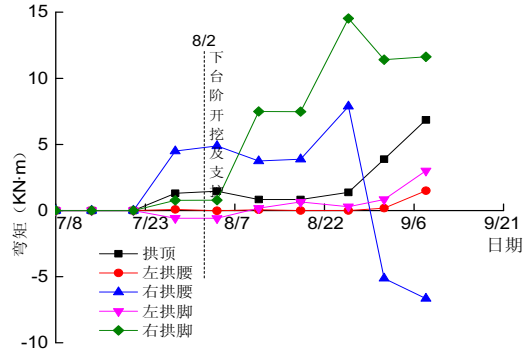


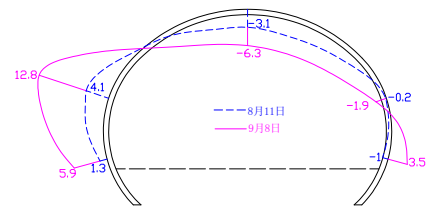
图12 YD钢架弯矩图

#### 3.3.2 钢拱架弯矩

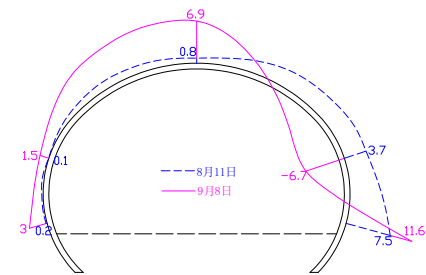
从图11、图12可以看出,拱架弯矩随时间增长整体呈增大趋势,但也存在正、负弯矩转换现象,表明隧道初期支护钢架应力随时间演化的复杂现象。结合3.3.1章节拱架轴力分析,拱架大部分为偏心受拉状态。较初支变形而言,拱架弯矩表现出力的稳定滞后现象。

分析图13(a)发现,拱顶及右拱腰为负弯矩,表明该位置处洞内侧受压,外侧受拉。左拱腰及左拱脚弯矩为正值,表明该位置处洞内侧受拉,外侧受压。左拱腰弯矩绝对值最大,从8月11日的4.1 kN·m增长为9月8日的12.8 kN·m。右拱脚弯矩值产生变号,从8月11日的-1 kN·m变为9月8日的3.5 kN·m。

分析图13(b)发现,右拱腰弯矩值产生变号,从3.7 kN·m变为-6.7 kN·m,表明初支钢架复杂的应力状态变化。其余部位均为正弯矩,表明这些部位洞内侧受拉,外侧受压。右拱脚弯矩绝对值最大,8月11日为7.5 kN·m,9月8日为11.6 kN·m。



(a) ZD



(b) YD

图13 钢架弯矩分布图/kN·m

#### 4 结语

通过量测初支变形、围岩与初支间的接触压力、钢拱架内力情况,研究了初支结构的受力时空效应演化规律,主要得出以下结论:

(1) 采用台阶法施工时,下台阶开挖后,拱顶下沉及水平收敛变形增大,拱架轴力有增大趋势,因此下台阶开挖阶段是隧道施工控制的重点阶段。同时应及时浇筑仰拱,使初支尽早封闭成环,减缓初支变形,抑制内力。

(2) 相较初支变形,围岩与拱架间接触压力、拱架轴力、拱架弯矩表现出力的稳定滞后现象。

(3) 围岩与拱架间接触压力及拱架内力沿断面分布不均,两侧不对称。左、右两洞平行开挖时,同一断面紧邻侧接触压力较大。钢拱架大部分偏心受拉,局部偏心受压。拱架弯矩随时间增长存在正、负号转换现象,表明初支钢架应力随时间演化的复杂现象。

#### 参考文献:

[1]廖伟,何平,颜杜民,陈峥,高红杰,王秀英.隧道初期支护钢拱架的应力分布规律研究[J].铁道学报,2017,39(09):140-147.

LIAO Wei, HE Ping, YAN Dumin, et al. Study on stress distribution law of steel arch of initial tunnel support[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(09): 140-147.

[2]文竞舟,张永兴,王成,姜兆华.钢拱架应力反分析隧道初期支护力学性能的研究[J].土木工程学报,2012,45(02):170-175.

WEN Jingzhou, ZHANG Yongxing, WANG Cheng, et al. Back analysis for the mechanical properties of initial tunnel support based on steel arch stresses[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(02): 170-175.

[3]曲直.公路隧道钢拱架支护结构稳定性预判研究[J].公路隧道,2014(02):6-9+53.

QU Zhi. Prediction Study on stability of support structure of arch frame in highway tunnel[J]. Road Tunnel, 2014(02): 6-9+53.

[4]黄宏伟,徐凌.大风埡口岩石公路隧道围岩及初期支护变形与内力研究[J].岩石力学与工程学报,2004(01):44-52.

HUANG Hongwei, XU Ling. Study on deformation and internal force of surrounding rocks and initial support in Dafengyakou rock road tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(01): 44-52.

[5]杨志浩,方勇,杨斌,徐晨.公路隧道下穿倾斜煤层采空区室内开挖模型试验[J].地下空间与工程学报,2017,13(04):974-981+1055.

YANG Zhihao, FANG Yong, YANG Bin, et al. Indoor model test of highway tunnel construction underlying inclined mined out area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(04): 974-981+1055.

[6]陈锦涛,韩爱果,任光明.基于应力监测的软岩隧道支护结构稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(01):178-182.

CHEN Jintao, HAN Aiguo, REN Guangming. Stability analysis of soft rock tunnel support structure based on stress monitoring[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(01): 178-182.

[7]来弘鹏,谢永利,刘苗,许海标.黄土地区浅埋暗挖地铁隧道衬砌受力分析[J].岩土工程学报,2011,33(08):1167-1172.

LAI Hongpeng, XIE Yongli, LIU Miao, et al. Mechanical characterization for linings of shallow excavation metro tunnel in loess region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1167-1172.

[8]胡江春,李渊,崔力,孙发用,吉梦洁.偏压隧道不均匀来压下降拱架应力变化的机理分析[J].中原工学院学报,2018,29(04):49-52.

HU Jiangchun, LI Yuan, CUI Li, et al. Analysis of the Mechanism of steel arch stress variation under disproportion pressure in unsymmetrically loaded tunnel[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2018, 29(04): 49-52.

作者简介:葛欣(1991-),男,河南商丘人。工程师,硕士研究生,主要从事市政、隧道工程施工研究工作。