

# 基于现场实测的炭质板岩隧道围岩大变形与衬砌受力特征研究

郭 健<sup>1</sup>, 阳军生<sup>1</sup>, 陈 维<sup>2</sup>, 沈 东<sup>1</sup>, 刘 涛<sup>2</sup>, 柴文勇<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 云南丽香高速公路投资开发有限公司, 云南 昆明 650217)

**摘要:** 炭质板岩是西南地区普遍存在的一种典型软岩, 隧道开挖过程中极易发生大变形、局部垮塌等灾害, 甚至造成重大经济损失与人员伤亡。以香丽高速公路海巴洛隧道典型炭质板岩工程为背景, 通过对炭质板岩围岩位移、初支内力和二衬内力的施工全过程进行监测, 探讨不同施工阶段隧道大变形段衬砌受力特征。分析结果表明: 上台阶开挖是围岩变形的主要发生阶段, 且围岩变形呈现出“左小右大”的不对称变形模式, 最大沉降(208.9 mm)发生在右拱肩处; 钢拱架应力沿洞周分布特点为“上大下小”, 上台阶最大压应力值为 550.4 MPa, 下台阶最大压应力值为 134.9 MPa; 初支拱顶、左拱肩、右拱肩监测点及二衬混凝土左仰拱处安全系数均小于规范限值, 支护结构偏于危险。研究成果可为类似炭质板岩隧道工程的设计、施工等提供借鉴和参考。

**关键词:** 岩石力学; 炭质板岩; 隧道; 现场监测; 大变形; 衬砌受力

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2019)04 - 0832 - 10

## Research on large deformation of surrounding rock and mechanical characteristics of lining of carbonaceous slate tunnel based on field measurement

GUO Jian<sup>1</sup>, YANG Junsheng<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>2</sup>, SHEN Dong<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>, CHAI Wenyong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

2. Yunnan Li Xiang Expressway Investment and Development Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650217, China)

**Abstract:** Carbonaceous slate is a typical complex rock mass commonly found in the southwestern region. Carbonaceous slate is prone to large deformation and partial collapse during tunnel excavation, and even causes major economic losses and casualties. Taking the Haibaluo Tunnel of the Xiangli expressway as an example, the mechanical characteristics of the large deformation section of the carbonaceous slate tunnel during different stages of the whole construction were investigated based on field monitoring of the displacement of surrounding rock and the internal force of the primary and secondary linings. The research results show that the excavation of the upper step is the main deformation stage of the surrounding rock, and that the deformation of the surrounding rock presents an asymmetrical deformation mode of “smaller at the left and larger at the right” with a maximum settlement(208.9 mm) at the right shoulder. The stress distribution of steel supports along the circumference is “larger at the upper and smaller at the lower”, and the maximum compressive stresses of the upper and lower steps are respectively 550.4 MPa and 134.9 MPa. The safety factors of the vault, the left and right arch shoulders

**收稿日期:** 2018 - 11 - 30; **修回日期:** 2019 - 01 - 12

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51878669); 云南省建设投资控股集团有限公司项目计划课题

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51878669) and Yunnan Construction Investment Holding Group Co., Ltd. Project Planning Project

**作者简介:** 郭 健(1993 -), 男, 2016 年毕业于中南大学土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面的研究工作。E-mail: jianguo@csu.edu.cn。通讯作者: 阳军生(1969 -), 男, 现任教授、博士生导师。E-mail: jsyang@csu.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1403

of the primary support and the left invert arch of the secondary lining concrete are less than the limit values. The research results can provide an useful reference for the design, construction of similar projects in the future.

**Key words:** rock mechanics; carbonaceous slate; tunnel; in-situ testing; large deformation; lining force

## 1 引言

近年来,随着我国西南地区交通运输业的不断发展,越来越多的隧道将不可避免的修建在复杂地质环境中。其中,炭质板岩作为西南地区一种普遍存在的复杂地质软岩体,因其具有层理发育,层间胶结差以及遇水易软化等特点,隧道在穿越该类地层时极易发生施工灾害<sup>[1-2]</sup>,如:开挖过程中发生掉块、坍塌,遇水膨胀崩解产生大面积塌方等,导致隧道开挖断面成型差<sup>[3]</sup>、初期支护变形大且难以收敛<sup>[4]</sup>,被迫进行大面积钢拱架拆换<sup>[5]</sup>等,甚至造成较大的经济损失和人员伤亡,是施工人员普遍关注且亟待解决的难题。因此,研究炭质板岩隧道大变形衬砌受力特征具有显著的工程意义和实际价值。

目前,国内外学者在软岩大变形隧道现场测试方面已开展了较为丰富的研究,也取得了一定的研究成果,较典型的有:戴永浩等<sup>[6]</sup>依托兰新铁路大梁隧道工程,测得薄层灰岩大变形段最大沉降量达 45.31 cm,提出了软岩大变形洞段联合支护方案;晏长根等<sup>[7]</sup>对成武高速武都西隧道进行了现场测试,获得了千枚岩地层大变形隧道 3 层支护荷载分布规律;刘志春等<sup>[8]</sup>对乌鞘岭隧道 F4 断层大变形段进行了现场测试,对开挖后的衬砌结构稳定性进行了分析判断;李鹏飞等<sup>[9]</sup>对堡镇隧道炭质页岩地层大变形段进行现场测试,探讨了围岩压力与初支各子构件的力学特性;王一鸣等<sup>[10]</sup>对三联隧道煤系地层二衬应力与变形进行现场测试,论证了施工现场采取的大变形控制措施具有良好效果。而现阶段关于炭质板岩大变形现场测试方面的研究则相对较少,研究成果也相对匮乏,如:邹 翀等<sup>[11]</sup>对木寨岭隧道大战沟斜井进行了超前大钻孔、超前导洞应力控制试验,对比支护结构现场测试结果得出应力控制效果;韩现民等<sup>[12]</sup>依托关角隧道炭质板岩不同支护参数段进行现场测试,通过试验结果确定了合理支护参数。综上可知,现阶段尚缺乏关于炭质板岩衬砌受力特征长时间跟踪监测及衬砌达到极限强度后的监测数据的研究,且针对炭质板岩大变形隧道围岩变形与衬砌受力两者关系的研究也偏少,现有结果很难用于指导工程实践。

鉴于此,本文以云南香丽高速海巴洛隧道典型炭质板岩大变形段为工程背景,通过对典型断面进行长周期监测,探讨炭质板岩隧道施工过程中围岩变形、初期支护和二次衬砌的受力特征,研究成果以期指导工程实践。

## 2 工程概况

海巴洛隧道是国家高速公路网 G0613 香格里拉至丽江高速公路全线建设的控制性工程之一。隧道左右线均为单向双车道隧道,左线长 2 289 m,右线长 2 262 m,设计时速 80 km/h;左右线均为单向双车道隧道,建筑限界净宽 8 m,净高 5 m,隧道最大埋深为 461 m。隧址区地质构造复杂,覆盖层主要分布第四系残坡积层砾质粉黏土、碎石土夹板岩碎石;下部基岩主要分布三叠系下统灰色、褐色炭质板岩<sup>[13]</sup>。现场勘探表明,隧道围岩为强风化炭质板岩,薄层状结构分布,倾角为 35°~40°,层理发育,层间黏结力差,现场揭示的围岩如图 1 所示。



图 1 隧道揭露炭质板岩状况

Fig.1 Carbonaceous slate of Haibaluo tunnel

该洞段隧道设计内轮廓半径为 5.5 m 的单心圆,隧道开挖高度为 10.29 m,跨度为 12.74 m。衬砌结构按照新奥法原理设计,采用复合式衬砌,初期支护采用锚网喷混凝土和钢拱架,辅以超前支护加固围岩,二次衬砌为模筑钢筋混凝土。施工采用台阶法开挖,上台阶滞后下台阶约 30 m。支护参数如表 1 所示,施工方法如图 2 所示。

前期施工过程中发现,隧道开挖后拱部层状围岩

表 1 隧洞支护参数

Table 1 Supporting parameters of the tunnel

衬砌类型	项目	数值
超前支护	型号	φ42 mm×4 mm 无缝钢管
	长度	4.5 m
	间距	环向 30 cm
	布设范围	拱部 120°
初期支护	喷射混凝土厚度	27 cm
	锚杆型号	φ42 mm×4 mm 注浆小导管
	锚杆长度	4 m
	锚杆间距	100 cm×60 cm
	钢拱架型号	I20 a
	钢拱架间距	60 cm
二次衬砌	二衬混凝土型号	C30
	二衬厚度	60 cm

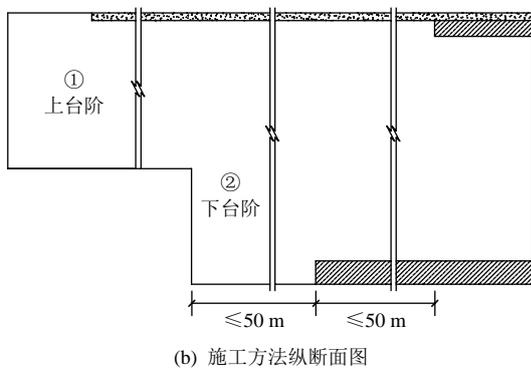
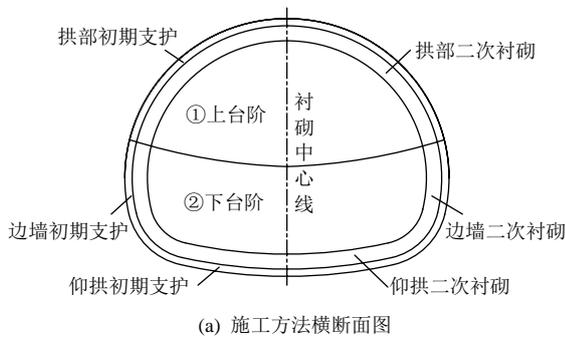


图 2 海巴洛隧道施工方法

Fig.2 Haibaluo tunnel construction method

易发生掉块、坍塌；层间夹有白色石英岩脉，削弱了围岩的层间结合力，开挖是易产生顺层剥落；层间富含裂隙水，导致层状炭质板岩出现崩解和膨胀，强度迅速降低，围岩产生大变形、支护遭到破坏。例如：海巴洛隧道开挖至 YK67+198 时，掌子面揭露围岩为强风化板岩，呈黑色碎裂结构，岩体软化、泥化严重，围岩整体稳定性差，隧洞开挖过程中多次出现初支大变形，已施作初支出现严重开裂、喷射混凝土剥落、钢拱架扭曲等病害(见图 3)。



(a) 初支混凝土开裂、剥落掉块



(b) 钢拱架扭曲

图 3 隧道破坏情况

Fig.3 Destruction of the tunnel

选取海巴洛隧道典型炭质板岩大变形段(YK67+148~YK67+248)进行初期支护变形及病害统计分析，统计结果如表 2 所示。

表 2 大变形、初支开裂统计表

Table 2 Statistics of large deformation and initial lining cracking

里程桩号	主要病害及情况描述
YK67+148~YK67+168	拱顶沉降达 125.8 mm，左边墙初支喷射混凝土开裂 3 处，拱顶出现渗水
YK67+168~YK67+188	拱顶沉降达 138.3 mm，右拱肩 AB 单元处工字钢压屈，拱顶处有滴渗水情况
YK67+188~YK67+208	拱顶沉降达 208.9 mm，左拱肩钢拱架屈曲，右拱腰钢拱架被压弯，初支开裂 2 处
YK67+208~YK67+228	拱顶沉降达 256.5 mm，初支环向裂缝 2 条，初支胀壳、鼓包比较严重
YK67+228~YK67+248	拱顶沉降达 199.4 mm，拱顶至右拱腰处初支出现剥落、掉块，初支开裂 3 处

由表 2 可知，海巴洛隧道在开挖过程中，围岩大变形和初支开裂等问题十分突出。经统计后，YK67+148~YK67+248 段共出现初支开裂 8 处，初支钢拱架屈曲 2 处，初支环向裂缝 2 处，初支渗漏水 2 处，监测全段出现大变形。因此，有必要对海巴洛隧道开展系统、全面地现场测试，对监测数据

深入分析，掌握隧洞开挖后围岩变形及支护受力的时空演变规律与特点，为初期支护和二次衬砌提供科学依据。

### 3 围岩变形与衬砌结构受力测试

#### 3.1 测试项目与测点布置

海巴洛隧道衬砌结构变形与受力现场测试项目分为围岩变形监测(包括拱顶沉降和水平收敛)、初期支护钢拱架应力监测以及二衬混凝土应力监测三类，监测时间从 2017 年 5 月~2018 年 9 月，选取 YK67+198 作为典型监测断面，监测位置纵断面图如图 4 所示，各工序施工至测试断面的具体时间及布设情况如表 3 所示。

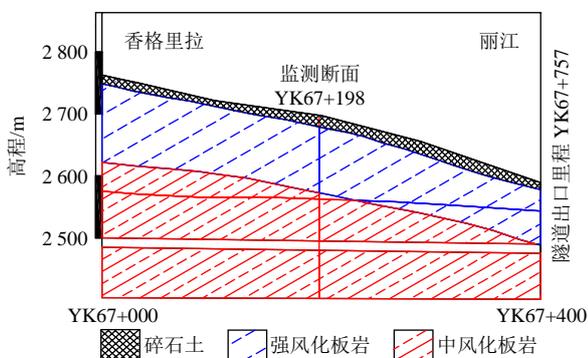


图 4 监测位置纵断面图

Fig.4 Monitoring position profile

表 3 各工序施工至测试断面 YK67+168 具体时间

Table 3 Construction time at the section of YK67+168

施工工序	现场施工至测试断面日期	元器件布设情况
开挖上台阶	20170516	埋设上台阶初支元器件
开挖下台阶	20170527	埋设下台阶初支元器件
施作仰拱	20170602	埋设仰拱初支元器件
浇筑二衬	20170614	埋设全环二衬元器件

#### (1) 围岩变形监测

根据规范<sup>[14]</sup>规定，拱顶下沉与周边收敛属于监控量测必测项目。根据规范及现场实际情况，每 10 m 设置一个监测断面，测点布置如图 5 所示。

隧道内变形监测项目有拱顶沉降和水平收敛监测。拱顶沉降采用全站仪非接触测量方法，采用测量精度为 0.01 mm 徕卡 TS30 全站仪进行观测。收敛变形采用三测点式，使用测量精度为 0.01 mm JSS30A 数显收敛计进行观测。掌子面开挖完成后，立即进行钢拱架喷射混凝土支护，并先布置 1, 2, 3 测点进行拱顶沉降测量，再布置 4, 5 测点进行水平收敛测量。

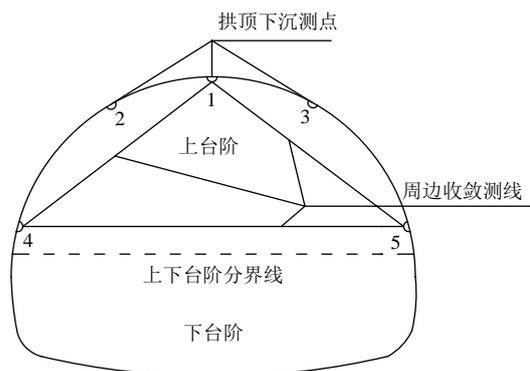


图 5 监测断面测点布置示意图

Fig.5 Layout of deformation monitoring points

#### (2) 初支内力测试

在监测断面布置 JMZX - 212T 型应变计，以监测钢拱架内力。在监测断面沿隧道轮廓在工字钢上下翼缘内侧各布设 9 个应变计进行监测，共计 18 个。布设情况如图 6 所示。

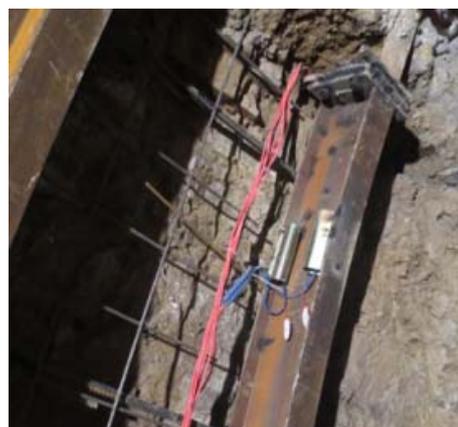
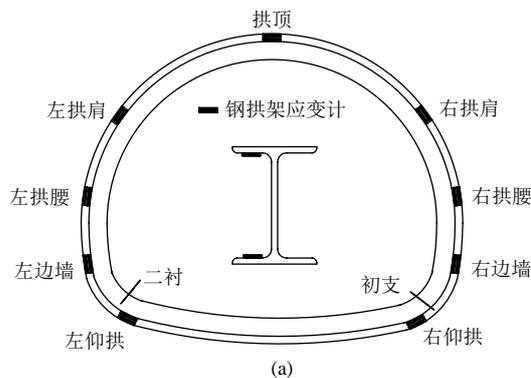


图 6 初支内力监测试验布设情况

Fig.6 Monitoring arrangement of steel support stresses

#### (3) 二衬内力测试

在监测断面布置 ZX - 215HA 型应变计，以监测二衬混凝土内力。沿隧道轮廓环向主筋各布设 10 个应变计进行监测，共计 20 个。布设情况如图 7 所示。

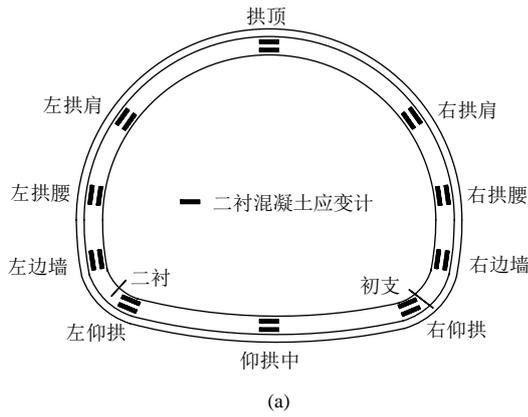


图 7 二衬内力监测试验布置情况

Fig.7 Monitoring arrangement of secondary lining

### 3.2 变形测试结果

选取海巴洛隧道 YK64+168 断面作为典型断面进行分析, 该断面围岩等级为 V 级, 拱顶下沉和水平收敛监测结果如图 8 所示, 其中以拱顶下沉、水平收敛为正。

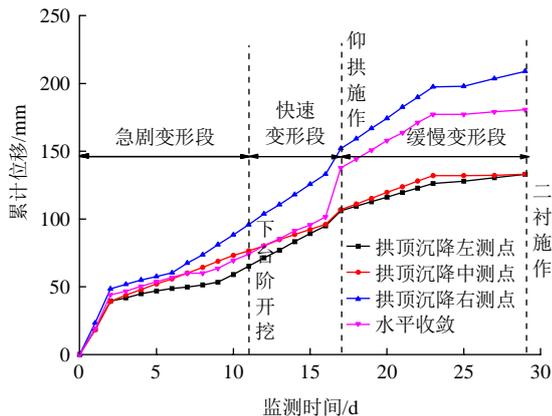


图 8 沉降下沉及水平收敛时程曲线图

Fig.8 Time-history curves of crown settlement and horizontal convergence

通过分析沉降下沉及水平收敛时程曲线图, 可得到以下结论:

(1) 隧道上台阶开挖至下台阶开挖(0~11 d), 隧

道围岩处于急剧变形期, 测点 1, 2 和 3 平均沉降速率分别为 6.9, 5.9 和 8.7 mm/d, 水平收敛速率 6.3 mm/d, 此阶段围岩变形量约占总变形量的 50%; 该时段变形具有速率快、持续时间长的特点, 分析应为隧道开挖后应力重分布及支护结构与围岩协调而引起。

(2) 隧道下台阶开挖至仰拱施作阶段(11~17 d), 隧道围岩处于快速变形期, 测点 1, 2 和 3 平均沉降速率分别为 5.9, 4.4 和 8.0 mm/d, 水平收敛速率 3.9 mm/d, 此阶段围岩变形量约占总变形量的 25%; 该时间段变形速率较大, 表明下台阶开挖后, 围岩与支护结构再次进行调整。

(3) 隧道仰拱施作至二衬施作阶段(17~29 d), 隧道围岩处于缓慢变形期, 测点 1, 2 和 3 平均沉降速率分别为 2.2, 2.1 和 4.7 mm/d, 水平收敛速率 3.5 mm/d, 此阶段围岩变形量约占总变形量的 25%; 该时段变形速率较小, 围岩应力调整已基本完成。需要注意的是, 在仰拱施作后, 各测点变形值均有一定的“跃迁”, 此时初支已闭合成环, 围岩与支护再次进行应力调整。

(4) 监测过程中, 隧道拱顶下沉呈现出明显的非对称性, 左侧拱顶沉降值为 132.9 mm, 右侧拱顶沉降值为 208.9 mm, 呈现出右侧沉降大于左侧沉降的特点。

图 9 给出了该断面不对称变形形式。从图 9 可以看出, 海巴洛隧道的破坏形式主要为非对称破坏, 其表现形式为围岩右侧变形大于左侧变形, 出现较大变形的一侧易在拱部产生破坏区。

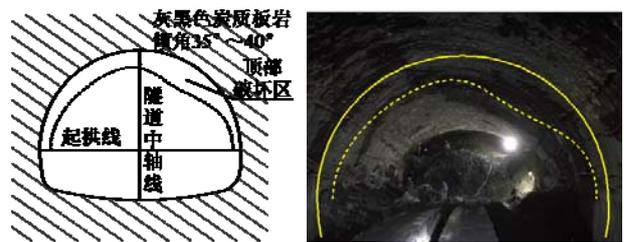


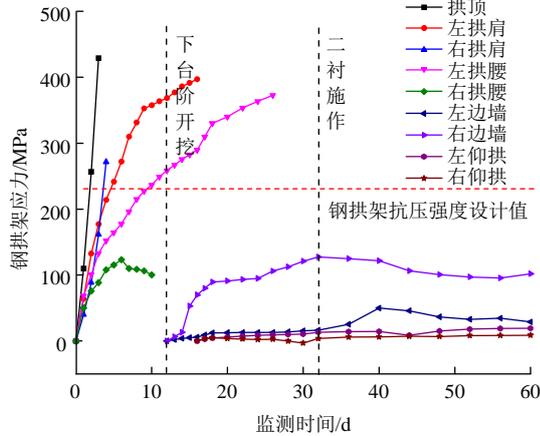
图 9 海巴洛隧道典型断面不对称变形形式

Fig.9 Asymmetric deformation of Haibaluo tunnel

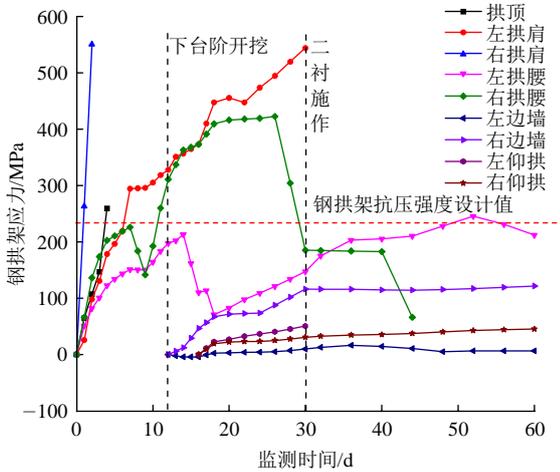
在监测期间内, 隧道拱顶下沉和水平收敛仍在增长, 在缓慢变形阶段的最小变形速率为 2.2 mm/d, 远大于规范<sup>[15]</sup>0.2 mm/d。现场采取较早施作二衬的方法, 承担部分因初期支护不足而产生的荷载, 可避免因围岩持续大变形而导致的隧道失稳。对于炭质板岩地层的软岩隧道, 较早施作二衬有利于大变形的控制。

### 3.3 初支内力测试结果

图 10 给出了海巴洛隧道典型断面钢拱架内力时程曲线图。规定压应力为正，拉应力为负。



(a) 钢拱架内侧应力时程曲线图



(b) 钢拱架外侧应力时程曲线图

图 10 钢拱架内力时程曲线图

Fig.10 Stress-time curves of steel supports

通过分析钢拱架内力时程曲线，可以得到以下结论：

(1) 隧道上台阶开挖后，钢拱架各测点的应力迅速增加；下台阶开挖后，钢拱架应力变化有所减缓；施作二衬后，钢拱架各测点应力大多稳定或趋于稳定。

(2) 钢拱架内侧应力均处于受压状态。上台阶开挖后，拱顶、右拱肩、左拱腰钢拱架应力呈线性增长，左拱肩在达到极限强度前呈线性增长，最大压应力分别为 429.2, 271.6, 372.8, 397.2 MPa，均大于钢拱架的抗压强度设计值 215 MPa，结构偏于危险。由于钢拱架受力过大，上述位置的应力测试元器件均遭到破坏。下台阶开挖后，其余测点应力均小于钢拱架强度设计值，最大应力值为 37.9 MPa，位于右边墙处。

(3) 钢拱架外侧应力均处于受压状态。上台阶开挖后，拱顶、右拱肩钢拱架应力呈线性增长，最大压应力分别为 259.7, 550.4 MPa。左拱肩钢拱架应力最大值为 544.2 MPa，均大于钢拱架的抗压强度设计值 215 MPa，结构偏于危险。下台阶开挖后，右拱腰应力值回落至设计强度安全线以内，其余测点应力均小于钢拱架强度设计值，最大应力值为 134.9 MPa，位于左拱腰处。

(4) 上台阶测点的应力值远大于下台阶测点和仰拱测点应力值，表明上台阶初期支护比下台阶初期支护承担更大的荷载。

根据钢拱架内外侧应力作出钢拱架内力分布图，如图 11 所示。

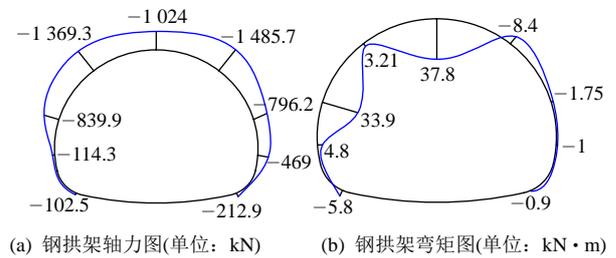


图 11 钢拱架内力分布图

Fig.11 Distribution of the internal force of steel supports

从图 11 可以看出，钢拱架最大轴力为 1 485.7 kN，位于右拱肩处。最大弯矩为 33.9 kN·m，位于左拱腰处，钢拱架受力分布规律为拱顶、拱腰处受力较大，边墙、仰拱处受力较小。根据《公路隧道设计细则》(JTGD 70—2010)<sup>[16]</sup>计算得出钢拱架安全系数如表 4 所示。

表 4 监测断面钢拱架安全系数表  
Table 4 Safety factor of steel supports

位置	内侧应力/MPa	外侧应力/MPa	安全系数 $K_{gy}$
左仰拱	-19.28	<u>-50.59</u>	4.65
左边墙	-28.88	-6.489	8.14
左拱腰	-372.79	<u>-212.35</u>	0.63
左拱肩	<u>-397.17</u>	<u>-544.15</u>	0.43
拱顶	<u>-429.24</u>	<u>-259.67</u>	0.55
右拱肩	<u>-271.59</u>	<u>-550.47</u>	0.43
右拱腰	<u>-100.36</u>	<u>-66.06</u>	2.34
右边墙	-101.91	-121.56	1.93
右仰拱	-8.82	-45.44	5.17

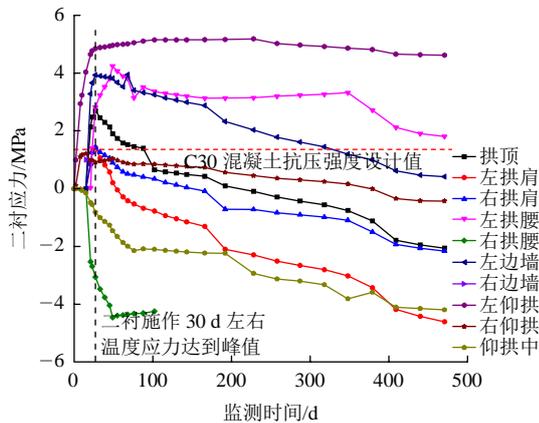
注：加下划线数据为元器件破坏前最后一次测得应力数据。

从表 4 可以得出，左拱腰、左拱肩、拱顶和右拱肩钢拱架应力监测点的安全系数均小于 1，表明

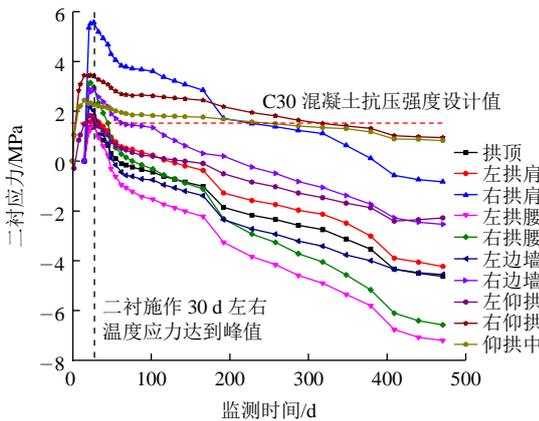
上台阶开挖后钢拱架受力偏于危险，现场具体表现为上台阶初支出现多处喷射混凝土剥落、掉块，拱肩处钢拱架扭曲；下台阶和仰拱段钢拱架安全系数基本符合要求。

### 3.4 二衬内力测试结果

图 12 给出了二衬混凝土内力时程曲线图。规定压应力为负，拉应力为正。



(a) 二衬内侧应力时程曲线图



(b) 二衬外侧应力时程曲线图

图 12 二次衬砌内力时程曲线图

Fig.12 Stress-time curves of the secondary lining

通过分析二次衬砌内力时程曲线，可以得到以下结论：

(1) 二次衬砌浇筑后，混凝土内部会产生温度应力，致使二衬混凝土产生较大的拉应力。在二衬浇筑 30 d 左右，混凝土温度应力达到峰值，之后温度应力逐渐消失，二次衬砌逐渐恢复正常受力。

(2) 二衬应力变化主要分为 3 个阶段。第 1 阶段为快速增长期(30~150 d)，该时段二衬混凝土的应力在快速增长，主要是从混凝土受拉状态逐渐转化为受压状态，产生的温度应力逐渐消失。第 2 阶段为缓慢增长期(150~400 d)，该时段温度应力基本消失，反映出混凝土的真实应力状态，绝大多数测

点处于受压状态，极少数测点处于受拉状态，应力仍在增长，但增速较缓。第 3 阶段为稳定期(>400 d)，该时段二衬应力变化幅度较小或保持不变，可认为二衬受力已基本稳定。

(3) 在稳定期，大多数二衬混凝土处于受压状态，最大压应力为 7.2 MPa，位于左拱腰外侧监测点，最大压应力小于混凝土抗压强度设计值。此外，左拱腰和左仰拱内侧出现较大拉应力，其值为 1.80 和 4.61 MPa，均大于 C30 混凝土强度设计值，结构偏于危险。施工现场仰拱处出现开裂，与监测结果相符，建议进行补强措施。

根据二衬内外侧应力作出二衬内力分布图，如图 13 所示。

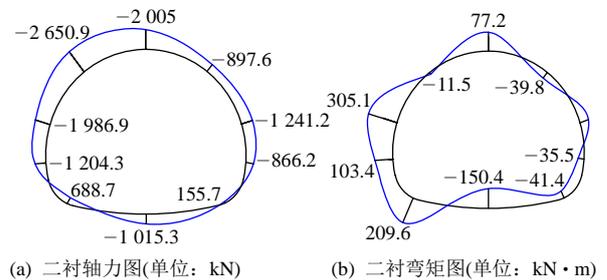


图 13 二衬内力分布图

Fig.13 Distribution of the internal force of the secondary lining

从图 13 可以看出，二衬混凝土大多处于受压状态，左右仰拱处混凝土处于受拉状态。二衬最大轴力为 2 650.9 kN，位于左拱肩处。最大弯矩为 305.1 kN·m，位于左拱腰处。

根据规范<sup>[15]</sup>，计算得出二衬衬砌的安全系数如表 5 所示。

表 5 监测断面二次衬砌安全系数表  
Table 5 Safety factor of the secondary lining

测点位置	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	抗压安全系数 $K_y$	抗弯安全系数 $K_w$
拱顶	-2 005.0	77.2	5.85	5.46
左拱肩	-2 650.9	-11.5	4.43	4.23
右拱肩	-897.6	-39.8	>10	>10
左拱腰	-1 986.9	305.1	5.91	3.76
右拱腰	-1 241.2	51.5	9.45	8.72
左边墙	-1 204.3	103.4	9.74	7.63
右边墙	-866.2	35.5	>10	>10
左仰拱	688.7	209.6	>10	1.95
右仰拱	155.7	-41.4	>10	>10
仰拱中	-1 015.3	-150.4	>10	7.47

从表 5 可以得出，该监测断面各测点二衬混凝土

土抗压安全系数均满足大于 2.0 的要求；抗拉安全系数最小值为 1.95，位于左仰拱处，表明二衬结构在此位置可能存在拉弯破坏，需进行加固处理，其余监测点抗拉安全系数均满足大于 2.4 的要求。

## 4 大变形段落试验结果评价与讨论

### 4.1 大变形段落试验结果评价

选取海巴洛隧道 YK67+198 作为典型断面进行监测，包括钢拱架应力和二衬混凝土应力，共布设 38 个监测点，共得到 38 条数据，可绘制成 38 条曲线。初支监测点因测试应力过大破坏 5 条，破坏率 27.8%，主要集中在上台阶；二次衬砌监测点仅内测点右边墙处因电缆损坏而遭到破坏，破坏率 5%。

初期支护钢拱架应力具有明显的“上大下小”特点，具体表现为上台阶开挖后，支护上台阶的钢拱架应力迅速增加并达到屈服状态。下台阶开挖后，下台阶钢拱架监测点应力水平处于上台阶监测点应力水平的 10%~30%，且较快趋于稳定。结合监测规律，对于现场施工，上台阶开挖宜选用“快速通过、及时封闭”的措施，必要时可采取临时仰拱或双层支护等措施，避免因初支钢拱架应力过大而过早失效，进一步加剧围岩大变形。

二衬混凝土应力具有调整时间长，变化缓慢的特点。监测 400 d 后，二衬应力逐渐趋于平稳，接近最终应力状态。二衬应力长时间未趋于稳定，体现出围岩具有流变特征，需进行长期监测。二衬混凝土左拱腰和左仰拱处内侧应力均出现拉应力长期大于抗拉强度设计值，现场表现为相应位置出现纵向裂缝，应及时加固补强，同时在二衬施作时要清除与仰拱接缝处虚渣，加强二衬与仰拱的整体协同性。

### 4.2 大变形段落监测结果讨论

为了探讨围岩变形与初期支护钢拱架应力之间的关系，绘制围岩变形和钢拱架应力-时间关系曲线，如图 14 所示。

通过分析围岩变形和钢拱架应力-时间关系曲线，可得到以下结论：

(1) 围岩变形与钢拱架应力具有同步的变化趋势，具体划分为 4 个时期。变化前期(0~4 d)，对应施工序列为上台阶开挖，两者变化值均处于急剧增大阶段，围岩变形与钢拱架应力急速增加；变化前中期(4~6 d)，由于初期支护的承载效应，围岩变形

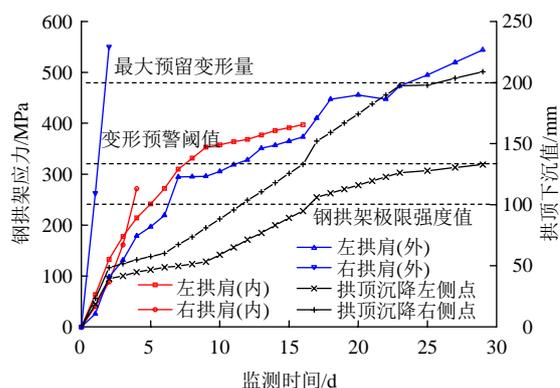


图 14 围岩变形和钢拱架应力时间关系曲线

Fig.14 Curves of surrounding rock deformation and steel support stress with time

增速放缓，钢拱架应力仍快速增加；变化中期(6~17 d)，两者共同进入快速变化阶段，围岩变形速率较前一阶段有所增加，钢拱架应力变化速率减缓，两者主要变化量在此阶段完成；变化后期(17 d 之后)，进入缓慢变化阶段，两者应力变化速率均已放缓，变化量缓慢增加。

(2) 围岩变形与钢拱架应力具有不对称变化的特点，两者均具有“左小右大”的特点。具体表现为：拱顶沉降左测点值小于右测点值，钢拱架拱肩处应力左侧值小于右侧值。这是由于现场围岩为向右侧倾斜的层状炭质板岩，层间黏合力较差，局部易形成破碎带，出现右侧压力大于左侧压力的情况，最终导致衬砌内力与变形都具有右侧大于左侧的特点。由于左右侧围岩压力与支护强度不耦合的情况，右侧过载区率先受到破坏，右侧钢拱架较快进入塑性屈服阶段而失效，围岩变形迅速增加，最终出现右侧变形大于左侧变形的结果。现场施工应针对围岩压力和支护强度不耦合的部位，重点进行补强措施。

(3) 拱肩各测点钢拱架应力最终均达到钢拱架极限强度值，各测点达到极限强度的时间分别为：左拱肩内测点(5 d)、左拱肩外测点(6 d)、右拱肩内测点(4 d)、右拱肩外测点(1 d)。右侧测点达到屈服强度的时间小于左侧测点所需时间，钢拱架应力最晚达到极限强度的时间对应的最大围岩变形量为 59 mm。隧道开挖后应力较大，钢拱架均在短时间内达到极限强度，钢拱架屈服时对应围岩变形较小，根据支护与位移关系<sup>[17]</sup>可知，测试断面的支护刚度较大，初期支护承受较大荷载，具有刚性破坏的特点。

(4) 拱顶沉降右测点在开挖后 16 d 达到变形预

警阈值, 此时对应的右拱肩处测点均已破坏, 左拱肩内外侧应力值分别为 397.2, 373.2 MPa, 反映出初期支护钢拱架破坏先于大变形失稳破坏。初期支护在前中期(4~6 d)有效地控制了变形。中期(6~17 d)因钢拱架应力达到极限强度进入塑性状态, 承载力降低, 导致围岩变形速率增加, 拱顶沉降右侧点迅速达到变形预警阈值。

## 5 结 论

(1) 采用台阶法开挖, 炭质板岩大变形表现出明显的“左小右大”非对称分布特点, 围岩最大变形量为 208.9 mm, 位于右拱肩测点; 上台阶开挖阶段的变形量约占总变形量的 50%, 是围岩大变形的产生阶段。因此, 在开挖施工过程中应重点关注上台阶开挖阶段, 且控制措施应具有针对性。

(2) 初期支护钢拱架应力以受压为主, 总体表现为“上部大、下部小”的特征, 且钢拱架应力与围岩变形不对称性一致。现场实测数据表明, 右拱肩测点应力大于左拱肩测点应力, 且拱顶、左拱肩、右拱肩、左拱腰的钢拱架测点应力值均大于其极限强度, 反映出钢拱架已进入塑性破坏状态, 支护体系失效导致大变形持续增加。

(3) 二衬混凝土应力稳定时间较长, 监测 470 余天应力仍缓慢增长, 绝大多数测点处于受压状态, 且测点应力值小于混凝土极限抗压强度。左仰拱处于受拉状态, 拉应力值为 4.61 MPa, 二次衬砌在该位置处于受拉破坏, 现场左仰拱处出现纵向裂缝。因此, 后续有必要进一步开展对仰拱开裂成因的研究。

通过实测数据及现场情况可知, 海巴洛炭质板岩大变形隧道采用目前的支护参数与施工工法, 初期支护与二次衬砌均遭到破坏。由此可见, 对于炭质板岩地层, 台阶法开挖效果并不理想。另外, 经过前期的深入研究, 笔者认为炭质板岩隧道开挖后如何有效地释放围岩应力是有效控制炭质板岩隧道大变形的关键。因此, 后续可从该方面开展控制炭质板岩隧道大变形的研究。

## 参考文献(References):

[1] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 170 - 171.(Editorial Committee of

- Engineering Geological Handbook. Engineering geological handbook[M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2007: 170 - 171.(in Chinese))
- [2] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1 - 2.(HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Engineering mechanics of soft rock[M]. Beijing: Science Press, 2002: 1 - 2.(in Chinese))
- [3] 王维富. 炭质板岩地层隧道施工要点及大变形防治措施[J]. 隧道建设, 2010, 30(6): 697 - 700.(WANG Weifu. Key point sand large deformation controlling construction of tunnel in carbonaceous slate[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(6): 697 - 700.(in Chinese))
- [4] 张 波. 木寨岭隧道板岩变形机理研究[J]. 铁道建筑, 2014, (5): 57 - 59.(ZHANG Bo. Study on deformation mechanism of slab rock in Muzhailing tunnel[J]. Railway Engineering, 2014, (5): 57 - 59.(in Chinese))
- [5] 刘 高, 张帆宇, 李新召, 等. 木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 2): 5 521 - 5 526.(LIU Gao, ZHANG Fanyu, LI Xinzha, et al. Research on large deformation and its mechanism of Muzhailing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 521 - 5 526.(in Chinese))
- [6] 戴永浩, 陈卫忠, 田洪铭, 等. 大梁隧道软岩大变形及其支护方案研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 2): 4 149 - 4 156.(DAI Yonghao, CHEN Weizhong, TIAN Hongming, et al. Study of large deformation and support measures of Daliang tunnel with soft surrounding rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.2): 4 149 - 4 156.(in Chinese))
- [7] 晏长根, 罗 鑫, 王 凯, 等. 深埋软岩大变形偏压公路隧道 3 层支护结构受力变形特征[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 98 - 107.(YAN Changgen, LUO Xin, WANG Kai, et al. Deformation and pressure characteristics of three-tier support structure in large deformation bias highway tunnel with deep buried soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 29(2): 98 - 107.(in Chinese))
- [8] 刘志春, 李文江, 孙明磊, 等. 乌鞘岭隧道 F4 断层区段监控量测综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1 502 - 1 511.(LIU Zhichun, LI Wenjiang, SUN Minglei, et al. Monitoring and comprehensive analysis in F4 section of Wuqiaoling tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1 502 - 1 511.(in Chinese))
- [9] 李鹏飞, 田四明, 赵 勇, 等. 高地应力软弱围岩隧道初期支护受

- 力特性的现场监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3 509 - 3 519.(LI Pengfei, TIAN Siming, ZHAO Yong, et al. In-situ monitoring study of mechanical characteristics of primary lining in weak rock tunnel with high grostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 3 509 - 3 519.(in Chinese))
- [10] 王一鸣, 任登富, 王立川, 等. 三联隧道穿越煤系地层软岩大变形控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增 1): 1 613 - 1 619. (WANG Yiming, RENG Dengfu, WANG Lichuan, et al. Control of large deformation for soft rock of Sanlian tunnel through coal-bearing strata[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(Supp.1): 1 613 - 1 619.(in Chinese))
- [11] 邹 翀, 王超朋, 张文新, 等. 兰渝铁路木寨岭隧道炭质板岩段应力控制试验研究[J]. 隧道建设, 2010, 30(2): 120 - 124.(ZOU Chong, WANG Chaopeng, ZHANG Wenxin, et al. Experimental study on stress controlling carbonaceous slate section of Muzhailing tunnel on Lanzhou-Chongqing railway[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(2): 120 - 124.(in Chinese))
- [12] 韩现民, 孙明磊, 李文江, 等. 复杂条件下隧道断面形状和支护参数优化[J]. 岩土力学, 2011, 32(增 1): 725 - 731.(HAN Xianmin, SUN Minglei, LI Wenjiang, et al. Optimization of section shape and support parameters of tunnel under complicated conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp.1): 725 - 731.(in Chinese))
- [13] 云南省交通规划设计研究院. 国家高速公路网 G0613 云南省香格里拉至丽江高速公路第 7 标段两阶段施工图设计. 第四册《隧道》[R]. 昆明: 云南省交通规划设计研究院, 2015.(Yunnan Communications Planning and Design Institute. Two-stage construction drawing design of the 7th bid section of Shangri-La—Lijiang expressway in Yunnan province[R]. Kunming: Yunnan Communications Planning and Design Institute, 2015.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG F60—2009 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.(The Professional Standards Complication Group of people's Republic of China. JTG F60—2009 Code for construction technique of highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2009.(in Chinese))
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(The Professional Standards Complication Group of people's Republic of China. JTG D70—2004 Code for Design of Highway Tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG/T D70—2010 公路隧道设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.(The Professional Standards Complication Group of people's Republic of China. JTG/T D70—2010 Guidelines for design of highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2010.(in Chinese))
- [17] 李恩忠, 初明祥, 潘传连. 软岩巷道地压与支护特性的图解分析[J]. 金属矿山, 1999, (5): 14 - 16.(LI Enzhong, CHU Mingxiang, PAN Chuanlian. Graphic analysis of the ground pressure and supporting characteristics of soft-rock openings[J]. Metal Mine, 1999, (5): 14 - 16.(in Chinese))