蒙华铁路中条山隧道高地应力 F7 断层软岩破碎段施工技术

刘成华

(蒙西华中铁路股份有限公司, 北京 100073)

摘要: 为解决中条山隧道在施工至高地应力 F7 主干断层段时,左右线已施工完成的 247 m 初期支护发生严重变形开裂的问题,选取不同段落对"刚性支护一次到位"和"柔性支护释放应力后进行二次支护"2 种方案进行试验,通过对监控量测数据分析和初期支护表面观察,得出以下结果: 1)软岩大变形段落采取"刚性支护一次到位"相比"柔性支护释放应力后进行二次支护"变形速率明显下降,最大收敛速率由 28 mm/d 下降至 18 mm/d,最大沉降速率由 24 mm/d 下降至 12.8 mm/d,释放应力时发生变形的"度"更易掌控; 2)在采取"刚性支护一次到位"的基础上,辅以优化"隧道边墙曲率"和"施工工法"等措施,能够有效控制隧道初期支护变形开裂,确保隧道结构的质量,顺利通过 F7 主干断层。

关键词: 蒙华铁路; 中条山隧道; F7 主干断层; 高地应力; 软岩大变形; 刚性支护; 柔性支护; 初期支护开裂

DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2018.S1.025

中图分类号: U 45 **文献标志码**: B **文章编号**: 2096-4498(2018)S1-0161-06

Construction Technology for Soft Rock Fracture Section of F7 Fault of Zhongtiaoshan Tunnel on Menghua Railway under High Ground Stress

LIU Chenghua

(*Mengxi-Huazhong Railway Co., Ltd., Beijing* 100073, *China*)

Abstract: In order to solve the serious deformation crack of primary support (247 m of excavated section) of Zhongtiaoshan Tunnel when encountering F7 main fault with high ground stress, two schemes, i.e. one time rigid support and stress release by flexible and secondary support, are carried out for different test sections; and then the monitoring data are analyzed and the primary support appearance is observed. Some conclusions are drawn as follows: (1) The deformation velocity of large deformation soft rock section by one time rigid support is much lower than that by flexible support; the maximum convergence velocity is reduced from 28 mm/d to 18 mm/d, and the maximum settlement velocity is reduced from 24 mm/d to 12.8 mm/d; and the deformation is much easier to control after stress release. (2) The primary support deformation crack can be effectively controlled, the tunnel structure quality can be guaranteed, and the successful passing through F7 main fault can be realized by adopting one time rigid support supplemented by optimized tunnel sidewall curvature and other construction methods.

Keywords: Menghua Railway; Zhongtiaoshan Tunnel; F7 main fault; high ground stress; large deformation of soft rock; rigid support; flexible support; primary support crack

0 引言

随着铁路建设区域不断扩大,隧道修建比例越来越大,艰险山区复杂地质条件下的隧道也越来越多。复杂地质条件对隧道施工影响非常大,尤其是断层破碎带、高地应力等,在该地质条件下施工隧道易发生大变形,造成初期支护结构开裂破坏,严重影响隧道施工和运营安全。

目前关于软岩大变形问题的研究很多,张文新等[1]和张文强等[2]对软岩大变形采取了"先柔后刚、先放后抗"的方法,得出应采取"应力释放"的措施,通过多次支护控制变形,并加强二次衬砌刚度; 高文山等[3]在应对高地应力软岩问题时提出了弱爆破、少扰动、强支护、早成环的理念,充分发挥围岩的自稳能力; 王建宇等[4]在对高地应力软弱围岩隧道挤压型变形

收稿日期: 2017-12-14; **修回日期**: 2018-06-02

作者简介: 刘成华(1984—),男,辽宁凌源人,2007 年毕业于辽宁工程技术大学,土木工程专业,本科,工程师,现从事隧道工程技术管理工作。E-mail: 278287376@qq.com。

研究试验的基础上,提出了可让性支护原理,得出“硬顶强支”难以解决变形的结论。

以上研究都是在遇到高地应力软岩段落时采取“应力释放出来再支护”,但在施工过程中,很难掌握应力释放时发生变形的“度”,造成初期支护结构受力达到极限破坏后,变形越来越难以控制,使问题变得严重。本文就中条山隧道高地应力 F7 主干断层已施工完成段初期支护发生严重变形开裂问题后,在现场选取相同地质条件的不同段落,开展“刚性支护一次到位”和“柔性支护释放应力后进行二次支护”2 种方案试验,研究应力释放时发生变形的“度”,为隧道后续施工提供参考和借鉴。

1 工程概况

蒙华铁路北起内蒙古浩勒报吉站,终点到达江西省吉安市,线路全长 1 837 km,规划设计输送能力为 2 亿 t/年,设计牵引质量为 10 000 t,设计速度为 120 km/h,是目前世界上一次建成里程最长的重载铁路和国内规模最大的运煤专线。蒙华铁路中条山隧道设计为双洞单线。隧道左线进口里程为 DK615 +065,出口里程为 DK633 +470,左线全长 18 405 m;右线进口里程为 DK615 +075,出口里程为 DK633 +485,右线全长 18 410 m。隧道按线路中线间距 35 m 设计,最大埋深约 840 m。

2 F7 断层隧道设计概况

2.1 地质条件

F7 断层位于新华夏构造体系中部运城多字型构造带中,经历了多次地壳运动,褶皱、断裂及其他构造行迹均很发育。F7 断层(DK620 +525 ~ +745)位于中条山西南段隆起带中,为中条山主干断层,发育在中条山北侧变质岩与南侧沉积岩接触带,表现为张扭性断层,宽度为 220 m,断面倾向 SE,倾角为 55° ~65°,与线路平面夹角为 75°,本段埋深 600 ~700 m。

F7 断层地貌上表现为呈线状的鞍部负地形,在地表见约 200 m 宽的灰白色黏土带露头,DZ -6 深孔钻孔揭露多层断层泥和断层角砾,角砾泥质弱胶结,岩芯多呈块状、碎块状,少量短柱状,局部粉末状、泥状,岩芯单轴抗压强度为 5 ~12 MPa。母岩成分以斜长片麻岩为主,其次为角闪岩、辉绿岩。钻孔断层段缩孔较严重,一般无水,局部有少量渗水,属 V 级围岩软岩。

设计勘察阶段在 DZ -6 钻孔内采用水压致裂法进行地应力大小及方向测量,共完成 7 个段落的地应力测量和 2 个测段的印模定向测量,测得洞身部位 620 m 位置最大水平主应力随深度变化成线性的规律,最大水平主应力最大,垂直主应力略次之,最小水平主应力最小,$S_H \geqslant S_v > S_h$。设计最大水平主应力为 14.51 MPa。

2.2 设计支护参数

中条山隧道过 F7 断层时隧道支护结构设计见图 1。衬砌采用 V_b 型断面,支护参数为全环 23 cm 厚喷射混凝土,H150 全环格栅钢架,间距 0.75 m/榀,12 根锁脚锚管,每根长 4 m,预留变形量为 10 cm,二次衬砌采用 C35 钢筋混凝土,厚 45 cm。

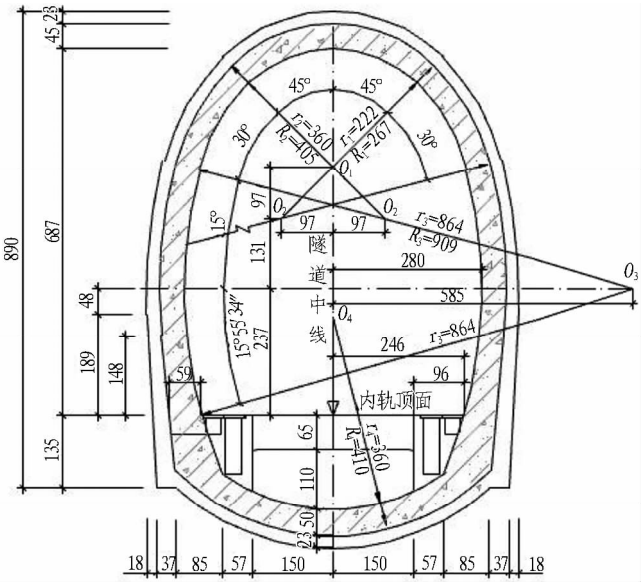


图 1 F7 断层带隧道支护结构设计图(单位:cm)

Fig. 1 Tunnel support structure design in F7 fault section (unit: cm)

3 施工变形情况分析

3.1 变形开裂情况

中条山隧道施工至 F7 断层时,已完成施工的左线 DK620 +525 ~ +658、右线 DK620 +535 ~ +649 共 247 m 长段落初期支护结构发生不同程度破坏。监控量测数据显示,水平收敛日速率最大达到 38 mm,收敛累计超过 25 cm(单线隧道),远大于监控量测规范中要求的 5 cm 控制基准值,同时出现初期支护混凝土开裂、剥落和初期支护钢架主筋扭曲变形(见图 2 和图 3)。通过对开裂位置检查,得知支护参数及施作质量满足要求。



图 2 初期支护混凝土开裂剥落

Fig. 2 Cracking and spalling of primary support concrete



图 3　初期支护拱架主筋扭曲变形

Fig. 3　Distortion of primary support steel frame

3.2　变形分类

通过对监测数据进行分析，结合现场初期支护变形开裂情况，现场收敛变形主要分为以下几类。

3.2.1　前期渐变，后期突变型

掌子面开挖后几天内收敛变形持续增大，经初期支护封闭成环，变形速率变为平缓，15 ~ 20 d 后又发生突变，且突变值较大，同时出现初期支护变形开裂，说明之前采取的支护结构强度不足，需要及时采取二次加强支护控制变形。

3.2.2　前期突变型

掌子面开挖后立刻出现围岩突变现象，在初期支护未封闭成环前变形达到 108 mm，同时初期支护结构发生破坏。

3.2.3　持续增长型

掌子面开挖后变形持续平缓增长，变形速率时有增大，直至最终收敛不出现突变情况，但变形终值超过允许值，属于大变形。

3.3　变形原因分析

1）地质条件差。本段处于 F7 断层核心部分，隧道开挖揭示断层带内围岩为太古界洞沟组涑水杂岩，岩性以斜长片麻岩为主，其次为角闪岩、辉绿岩，节理裂隙极发育，岩脉产状不稳定，分布无规律；受构造运动影响，岩体破碎，胶结性差，强度低，属软岩，自稳能力差。

2）隧道埋深大，地应力高。应力测试结果显示该段应力等级为 1.62 ~ 3.86，属极高地应力区。岩体内的剪应力超限引起剪切蠕动，变形持续发生，支护结构不足以抵抗产生的形变压力。

3）由于单线铁路隧道普通断面“瘦高”的特点，抵抗水平挤压能力差[5]。

4）原有采取的施工方法、支护结构形式以及支护时间等，不能有效控制其适合围岩的动态演化趋势。

4　变形控制施工技术

针对中条山隧道高地应力 F7 断层破碎带出现的变形情况，结合国内其他软岩大变形隧道施工经验，对出现变形的已施工段落和未施工段落采取不同的控制措施。

4.1　已施工变形段落加固措施

根据现场量测数据和初期支护变形开裂情况对一般变形地段采取增设锁脚注浆锚管及水平砂浆锚杆进行加固控制变形；对初期支护变形开裂严重地段，增设套拱控制初期支护结构继续变形，确保现场施工安全，待变形稳定后，对围岩进行注浆加固，拆除侵占净空套拱结构，对已破坏的初期支护结构进行换拱。

4.2　试验段施工技术方案比较

根据超前地质预报结果，前方可预报范围地质条件与变形开裂段相同，且没有转好的迹象。为确保后续结构受力合理，确定最优支护参数，通过组织相关专家现场踏勘，最终确定在左右线掌子面前方选取不同段落按“刚性支护一次到位”和“柔性支护释放应力后进行初期支护”2 种模式进行试验，通过试验确定最终支护参数。

4.2.1　柔性支护释放应力后进行二次支护

“柔性支护释放应力后进行二次支护”是指第 1 层初期支护采用 H150 格栅钢架 + 网喷混凝土，预留 1 层 H150 格栅钢架 + 网喷混凝土支护空间[6]，支护完成后允许出现一定程度的变形，释放大部分地应力后，在第 1 层初期支护结构未遭到破坏前采用 H150 格栅钢架 + 网喷混凝土进行二次加强支护，待变形稳定后再施作二次衬砌模筑混凝土。

4.2.2　刚性支护一次到位

“刚性支护一次到位”是指初期支护采用 H230 格栅钢架 + 网喷混凝土，间距由 75 cm 调整为 60 cm，预留变形量 15 cm，在开挖后及时采取高强度支护来控制变形，待变形稳定后再施作二次衬砌模筑混凝土[7]。

4.2.3　2 种施工技术方案试验监测结果

在隧道过 F7 断层施工时记录监控量测数据，绘制收敛变形量曲线和沉降变形曲线，如图 4 和图 5 所示。根据数据曲线图分析围岩变形稳定情况。

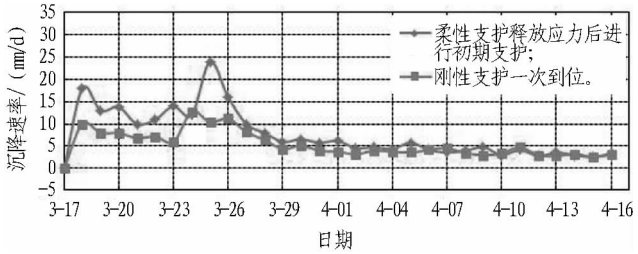


图 4　2 种模式下隧道沉降变形曲线（2017 年）

Fig. 4　Curves of tunnel settlement under two support modes（in 2017）

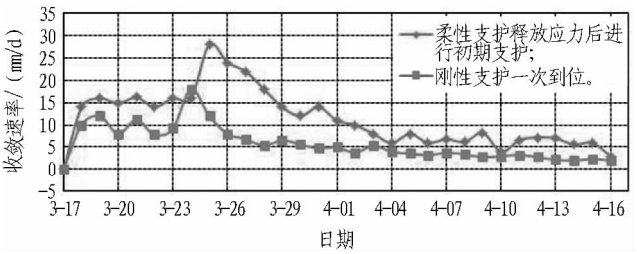


图5 2种模式下隧道收敛变形曲线(2017年)

Fig. 5 Curves of tunnel convergent deformation under two support modes (in 2017)

4.2.3.1 柔性支护释放应力后进行二次支护

从图4和图5可以看出:在开挖下台阶后沉降突然增大,最大沉降速率达24 mm/d,平均控制在10 mm/d,收敛速率在开挖下台阶和仰拱时最大达到28 mm/d,在采取二次初期支护加固措施后,变形速率开始减慢,由于前期初期支护预留变形量不足,格栅钢架+网喷混凝土二次加固后导致初期支护侵限,不得不在后续施工中拆换钢架,费时费力,控制围岩变形效果及经济性较差,在软岩高地应力段要慎重采用。

4.3.3.2 刚性支护一次到位

从图4和图5可以看出:与"柔性支护释放应力后进行二次支护"相比沉降与收敛变形均有所减小,但最大沉降速率达12.8 mm/d,最大收敛速率达18 mm/d,且后期变化值仍然较大,在采取长锚杆补强加固措施后,变形速率开始减慢,最终仍有部分初期支护侵限,说明试验段采用的支护参数仍需要加强。

4.2.4 方案比选及确定施工参数

参考试验段变形分析及理论模拟计算结果,经组织专家讨论及现场试验段实践证明,F7断层带施工宜坚持"早封闭、强支护"原则,采用刚性支护一次到位控制围岩变形。

4.2.4.1 加大支护强度

初期支护拱架采用H230格栅钢架,同时钢架主筋由原来ϕ22 mm调整为ϕ25 mm,"8字结"及箍筋间距加密,拱架间距缩小为50 cm。

4.2.4.2 预留变形量加大

为防止出现持续变形侵占二次衬砌净空,施工过程中将预留变形量加大到30 cm[8]。

4.2.4.3 优化边墙曲率[9]

原设计断面边墙为直边墙,从结构受力方面不利于控制水平收敛,经过对模拟断面受力进行分析,边墙结构形式由直墙调整为较利于水平收敛变形控制的曲墙结构,优化后的结构断面见图6。曲率优化前后结构受力对比见图7和图8,通过计算得出改变边墙曲率后,结构轴力变化不大,而弯矩最大值减小了33%,可见隧道改变边墙曲率后能有效提高结构承载能力。

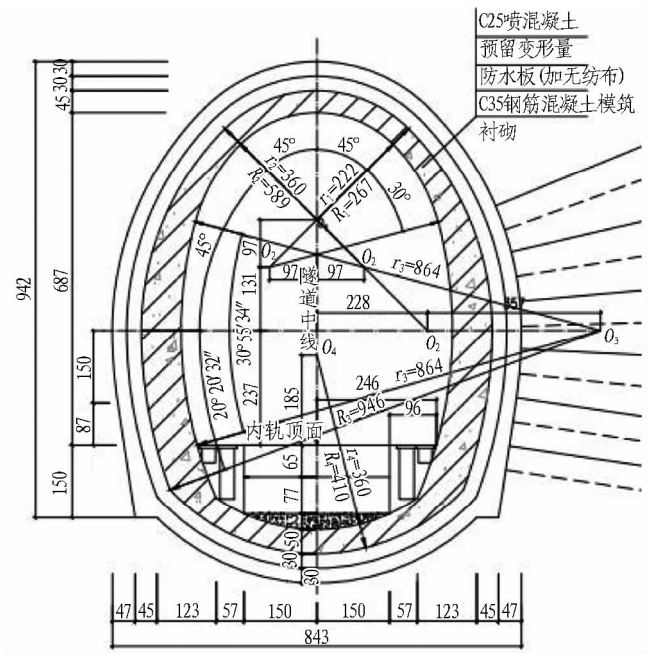
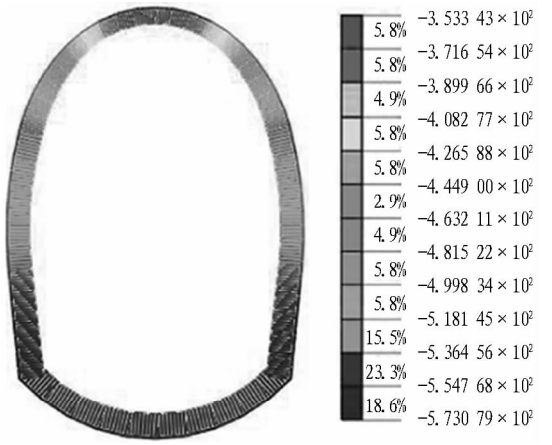
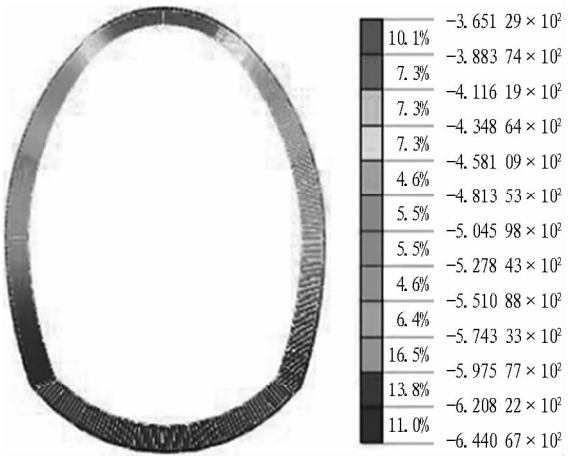


图6 曲率优化后的隧道结构断面(单位:cm)

Fig. 6 Tunnel structural section after curvature optimization (unit: cm)



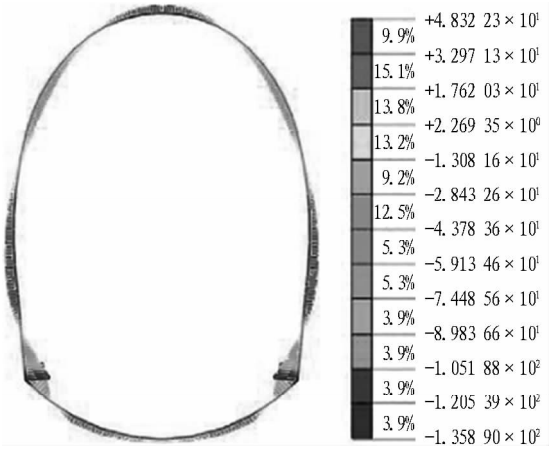
(a) 优化前



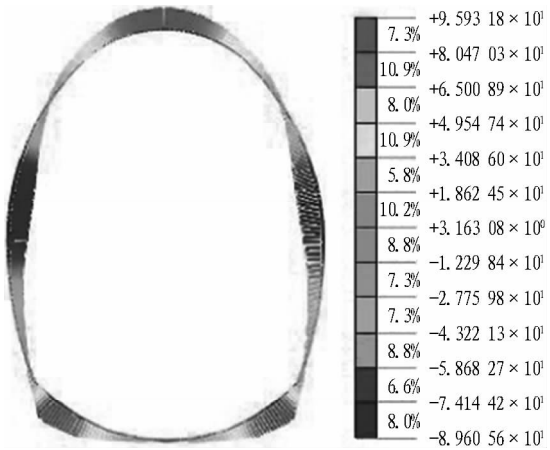
(b) 优化后

图7 曲率优化前后结构轴力对比分析(单位:kN)

Fig. 7 Comparison of tunnel structural force before and after curvature optimization (unit: kN)



（a）优化前



（b）优化后

图 8　曲率优化前后结构弯矩对比分析（单位：kN · m）

Fig. 8　Comparison of tunnel structural force before and after curvature optimization（unit：kN · m）

4.2.4.4　加强支护，提高支护体系整体受力性能

支护体系包含初期支护钢架及网喷混凝土等支护结构本身，还包括通过系统锚杆、径向注浆等方式加固支护结构与周边围岩的连接，从而使支护结构和围岩形成整体支护体系来抵抗开挖后地应力作用[10]。具体采取的措施：增加水平砂浆锚杆（长 4.5 m），拱架连接部位增设注浆锚管（长 4.5 m），注硫铝酸盐水泥加固及增加拱架连接筋等。

4.2.4.5　初期支护及时封闭成环控制围岩变形

采用下台阶与仰拱同步开挖支护工法施工，仰拱初期支护紧跟下台阶，及时封闭成环[11]，同时严格控制上台阶长度（5 ~ 6 m），以利于开挖后 72 h 内初期支护成环形成整体结构受力[12]。

4.3　试验取得的支护参数

优化隧道衬砌结构，支护参数采用全环 H230 格栅钢架，间距 0.5 m/榀，ϕ25 mm 主筋，“8 字结”及箍筋间距加密，钢架边墙位置曲率加大 38 cm；30 cm 厚网喷混凝土；增加水平砂浆锚杆，长 4.5 m；台阶位置每侧 2 根锁脚锚管，中台阶位置增加 2 根，锁脚锚管长 4.5 m，注硫铝酸盐水泥加固；预留变形量 30 cm；二次衬砌采用 C35 钢筋混凝土，厚 50 cm。

4.4　强化信息监测手段的应用

4.4.1　超前地质预报

在 F7 断层带施工中加强超前地质预报工作，按照复杂地质环境下要采取多种预报手段相互印证的方式，综合分析判断前方围岩情况，提前预知前方地质条件，以便及时采取相应的预防措施。

4.4.2　监控量测

隧道穿越断层地段施工时监控量测工作至关重要，尤其是在高地应力情况下，系统、完善的监控量测体系既可保证现场施工安全，同时对于及时调整施工工法和支护参数具有重要的指导意义。

中条山隧道在施工过程中将监控量测纳入工序管理，安排专业人员及时进行监测。为准确掌握隧道变形情况，在采取常规收敛监测手段的基础上，对每个周边收敛点采取监测绝对收敛值，掌握每个点的位移值，分析取得两侧边墙真实的变形结果。

5　施工效果验证

中条山隧道 F7 断层带在施工过程中结合超前地质预报、开挖后围岩情况及监控量测数据对试验段的支护参数进行进一步的动态优化设计，后续施工过程中围岩变形得到有效控制，顺利通过 F7 断层带。尤其是支护结构加强及断面曲率优化地段，监控量测数据见图 9 和图 10，可知：拱顶沉降速率最大值为 3.2 mm/d，累计沉降最大值为 48.6 mm；净空收敛速率最大值为 3.6 mm/d，累计收敛最大值为 53.1 mm，未有较大变形，未出现初期支护混凝土开裂剥落现象，初期支护钢架结构完整，喷射混凝土表面平顺。

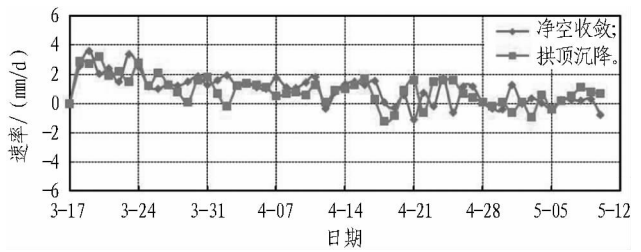


图 9　初期支护净空收敛和拱顶沉降速率变形时态曲线（2017 年）

Fig. 9　Deformation rate-time curves of convergence deformation and crown top settlement of primary support（in 2017）

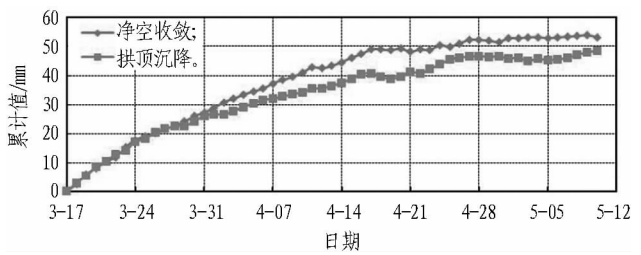


图 10　初期支护净空收敛和拱顶沉降累计变形时态曲线（2017 年）

Fig. 10　Accumulative deformation-time curves of convergence deformation and crown top settlement of primary support（in 2017）

6 结论与建议

1)中条山隧道F7断层软岩高地应力大变形是该工程施工中极少遇到的重大施工难题,目前F7断层带隧道已施工完成,根据现场左右线试验段施工过程不断总结,形成了针对于F7断层高地应力破碎围岩基本施工支护参数。初期支护采用优化曲率强度较高的H230格栅钢架,预留一定变形量,同时增加砂浆锚杆、锁脚锚管等加固措施。但由于不同地质条件下的变形原因不一样,因此在本隧道今后施工中,继续加强超前地质预报和监控量测工作,动态反馈与控制软岩大变形,不断完善总结,进一步深化并丰富软岩隧道大变形研究,为该类隧道工程设计施工提供借鉴。

2)高强度初期支护一次刚性支护到位能够有效减小围岩变形,但是不能抑制变形,必须辅以仰拱与下台阶同步开挖支护工法、优化边墙曲率及增加水平砂浆长锚杆等措施来共同控制大变形,同时预留变形量较普通地段要增大20~30 cm。

3)高地应力软岩大变形地段过早地施作二次衬砌,二次衬砌结构将承担围岩蠕变产生的附加荷载。因此,在初期支护结构能保证施工安全的条件下,二次衬砌施工应在地应力释放基本完成、变形趋于稳定后进行,还应适当加大二次衬砌的强度和厚度,采取钢筋混凝土施工。

4)在大变形地段保证拱脚稳定对于维护初期支护体系的稳定意义较大,采用锁脚锚管并注浆比较有效。同时二次衬砌仰拱的及时施作也可以有效控制水平方向的收敛。

5)在中条山隧道F7断层带施工时根据围岩特征和变形规律,采取动态支护措施(提高支护系统的刚度与整体受力性能,初期支护快速封闭成环,合理预留变形量,适时施作二次衬砌)对大变形实施动态控制取得了较好的效果。下一步施工过程中需进一步研究如何能提前预知大变形产生的问题,只要能提前预知,现场施工就可以采取相应的预防措施,避免造成初期支护失效、二次衬砌开裂等工程质量问题。

参考文献(References):

[1] 张文新, 孙绍峰, 刘虹. 木寨岭隧道高地应力软岩大变形施工技术[J]. 现代隧道技术, 2011(2): 78.
ZHANG Wenxin, SUN Shaofeng, LIU Hong. Construction techniques of Muzhailing Tunnel with high ground stresses and large soft rock deformations[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011(2): 78.

[2] 张文强, 王庆林, 李建伟, 等. 木寨岭隧道大变形控制技术[J]. 隧道建设, 2010, 30(2): 157.
ZHANG Wenqiang, WANG Qinglin, LI Jianwei, et al. Case study of large deformation control technology of Muzhailing Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(2): 157.

[3] 高文山. 西秦岭隧道穿越F54断层破碎带施工技术[J]. 现代隧道技术, 2011(2): 94.
GAO Wenshan. Construction techniques of West Qinling Tunnel to traverse F54 Fault[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011(2): 94.

[4] 王建宇, 胡元芳, 刘志强. 高地应力软弱围岩隧道挤压型变形和可让性支护原理[J]. 现代隧道技术, 2012(3): 9.
WANG Jianyu, HU Yuanfang, LIU Zhiqiang. Tunneling in squeezing ground with yielding supports[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012(3): 9.

[5] 李守刚. 关山特长隧道高地应力硬岩大变形规律研究[J]. 人民长江, 2015(12): 48.
LI Shougang. Study of large deformation law of hard rock of Guanshan Extra-long Tunnel under high in-situ stress[J]. Yangtze River, 2015(12): 48.

[6] 王洪昌. 双层初期支护在大变形隧道中的应用技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
WANG Hongchang. The technology research of the double primary support in the large deformation tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[7] 刘国庆. 高地应力软岩大变形隧道二次衬砌施作时机研究[J]. 现代隧道技术, 2013(2): 84.
LIU Guoqing. On the construction time of a secondary lining for a tunnel with large deformation in soft rock with high ground stress[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013(2): 84.

[8] 戴希红, 刘剑文. 公路隧道复杂地质段初期支护大变形的整治[J]. 隧道建设, 2003, 23(4): 52.
DAI Xihong, LIU Jianwen. Large deformation treatment of primary support of highway tunnel in complex geological section[J]. Tunnel Construction, 2003, 23(4): 52.

[9] 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(增刊1): 725.
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(S1): 725.

[10] 王树栋. 复杂地应力区隧道软弱围岩大变形控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
WANG Shudong. Research on large deformation control technique of soft surrounding rock in complex crustal stress tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

[11] 张端良, 王剑, 张运良. 软弱围岩隧道变形规律与施工安全控制技术[J]. 公路工程, 2011(2): 124.
ZHANG Duanliang, WANG Jian, ZHANG Yunliang. Deformation of soft rock tunnel and technology of construction safety control[J]. Highway Engineering, 2011(2): 124.

[12] 李国良, 朱永全. 乌鞘岭隧道高地应力软弱围岩大变形控制技术[J]. 铁道工程学报, 2008(3): 54.
LI Guoliang, ZHU Yongquan. Control technology for large deformation of highland stressed weak rock in Wushaoling Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(3): 54.