

大断面黄土隧道台阶法双层支护技术

李国良¹, 宋冶², 李雷¹, 王新东¹, 李波²

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043; 2. 中铁西南科学研究院有限公司, 成都 610031)

[摘要] 依托郑西高铁高桥隧道小角度下穿既有南同蒲铁路施工实践,通过试验研究取得大断面黄土隧道台阶法双层支护体系的力学特性及施工技术关键,在砂质新黄土条件下成功解决埋深仅11 m的下穿运营铁路的超大断面(171 m²)隧道施工,对类似工程的设计与施工具有重要参考价值。

[关键词] 大断面黄土隧道;台阶法;双层支护;下穿

[中图分类号] U455 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)08-0054-10

1 前言

郑西高速铁路有数座大断面黄土隧道下穿高速公路和铁路,提出有效控制地层沉降的适用工法,使隧道开挖既确保安全又不影响既有线正常运营是设计与施工面临的巨大挑战。为了解决大断面黄土隧道下穿运营铁路的施工技术关键,在郑西高铁陕西段高桥隧道下穿南同蒲铁路段开展了台阶法双层支护的试验研究。本文对此重点介绍大断面黄土隧道台阶法双层支护体系的力学特性及施工技术关键。

2 工程背景

郑西高铁高桥隧道位于陕西潼关县境内,洞身处于I级黄土台塬区,全长1 458 m。在隧道出口段与既有南同蒲铁路小角度下穿立交(交角23°58'),下穿段总长90 m,最小埋深11 m(小于1倍隧道开挖宽度),如图1所示。下穿段隧道开挖面积171 m²,开挖宽度15.5 m、高度13.4 m。该段穿越Q3~Q2砂质黄土地层,V级围岩,表1为高桥隧道黄土地层物理力学参数表^[1]。

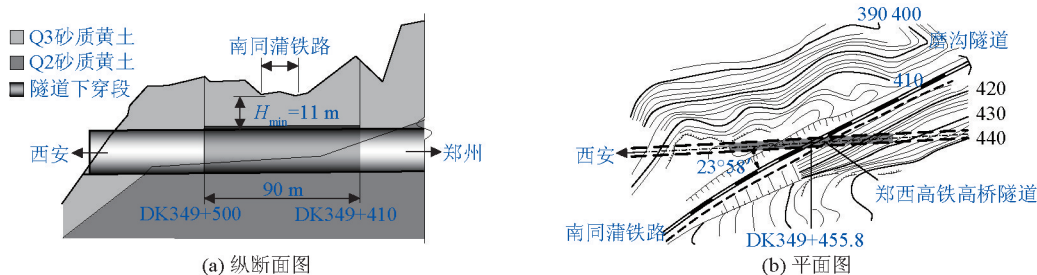


图1 高桥隧道下穿段纵断面及平面图

Fig. 1 The longitudinal section and plan of the under-crossing section in Gaoqiao tunnel

[收稿日期] 2014-04-20

[基金项目] 铁道部科技研究开发计划项目(2005K001-D(G)-1)

[作者简介] 李国良,1966年出生,男,甘肃庄浪县人,中铁第一勘察设计院集团有限公司副总工程师,研究方向为隧道及地下工程;
E-mail: lgl6604@vip.sohu.com

表1 高桥隧道黄土地层物理力学参数表

Table 1 The physical-mechanical parameters of loess in Gaoqiao tunnel

黄土类型	密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水量 w /%	孔隙比 e	饱和度 S_r /%	液限 ω_L /%	塑限 ω_P /%	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	粘聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
Q_3^{col} 砂质黄土	1.678	10.3	0.78	38.0	26.3	17.5	8.8	-1.0	18.5	20.2
Q_2^{col} 砂质黄土	1.774	8.6	0.68	41.4	27.8	18.2	9.6	-0.8	20.5	21.3

注:力学指标 C 、 φ 值由直剪试验取得。下穿段开挖后实测含水量为 11.7%~14.2%

高桥隧道下穿既有南同蒲铁路段,具有特浅埋、超大断面、小角度下穿运营铁路和砂质新黄土易坍塌等一系列技术难点,施工风险极大,需要严格控制隧道拱部下沉及地表沉降以确保隧道施工安全和既有铁路的正常运营。同时,还要考虑建设工期和经济性要求,既确保安全又能实现快速施

工。通过多种方案比选,最终从隧道建设工期以及避免长时间影响既有铁路运营考虑,确定高桥隧道下穿段采用长管棚(100 m)、台阶法开挖、双层初期支护的施工方案。图2、图3分别为下穿段衬砌断面图和台阶法实际开挖顺序图,图4为下穿段试验测试布置图。

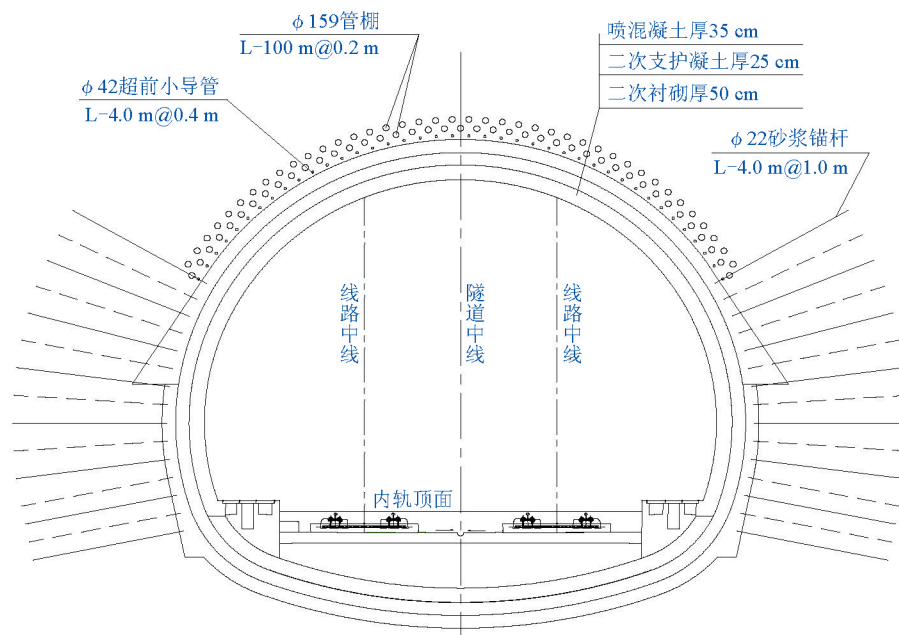


图2 高桥隧道下穿段双层支护衬砌断面

Fig. 2 Lining section of double-layer support of the under-crossing section in Gaoqiao tunnel

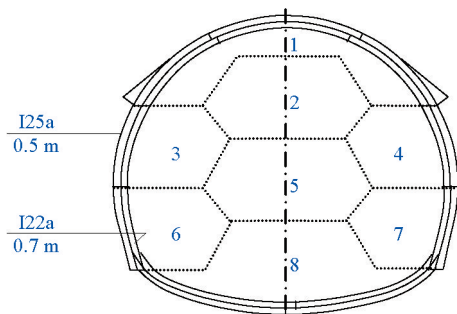


图3 双层支护台阶法实际开挖顺序

Fig. 3 The actual excavation sequential of benching method with double-layer support

3 台阶法双层支护力学特性

3.1 围岩变形特性

3.1.1 净空位移

高桥隧道下穿段台阶法双层支护净空位移最大值和速率实测结果见表2。当二层落后一层1榀钢架时(0.5~0.6 m),拱部下沉仅为50~60 mm。落后3榀时(1.5~1.8 m),拱部下沉为90 mm水平,明显大于落后1榀的情况。浅埋下穿段拱部下沉基本控制在50~60 mm的较低水平,除与仰拱封闭距离短有关外,与同时施作的双层支护控制净空位移

的效果密切相关。即双层支护控制拱部下沉优于单层支护,但其控制效果与二层是否紧跟一层有关。试验显示紧跟的效果明显好于滞后。二层支护不同跟进情况下的净空位移时态曲线如图5所示。

台阶法双层支护净空位移特性统计显示(见图6),拱脚与拱顶下沉无差异,二者之比约为1,这与浅埋单层支护台阶法相似^[2]。所不同的是,在埋深更浅的下穿段,双层支护的水平收敛远小于拱部下沉,下沉与收敛之比一般达到5,在立交点附近则更高(见图6c)。表明台阶法不论单层还是双层支护,净空位移均以拱部整体下沉为主要特征,且埋深越小整体下沉越明显。在下穿交叉点附近

由于埋深最小,拱部整体下沉更为显著。

3.1.2 地中位移

测斜孔测试显示(见图7),上台阶到达时边墙范围已发生水平位移达到总位移(衬砌施作后)的29%,表明台阶法开挖初期对黄土的扰动,其初期位移可达总位移的30%左右。但试验段总的地中水平位移很小($< 10\text{ mm}$),这与水平收敛很小的特性互相印证。地表垂直钻孔和洞内水平钻孔位移计测试显示(见图8和图9),拱顶附近上方地层相对地表的垂直位移很小($< 5\text{ mm}$),反映拱部地层具有整体下沉趋势;地中水平位移很小($< 6\text{ mm}$),这与衬砌紧跟施作不无关系。

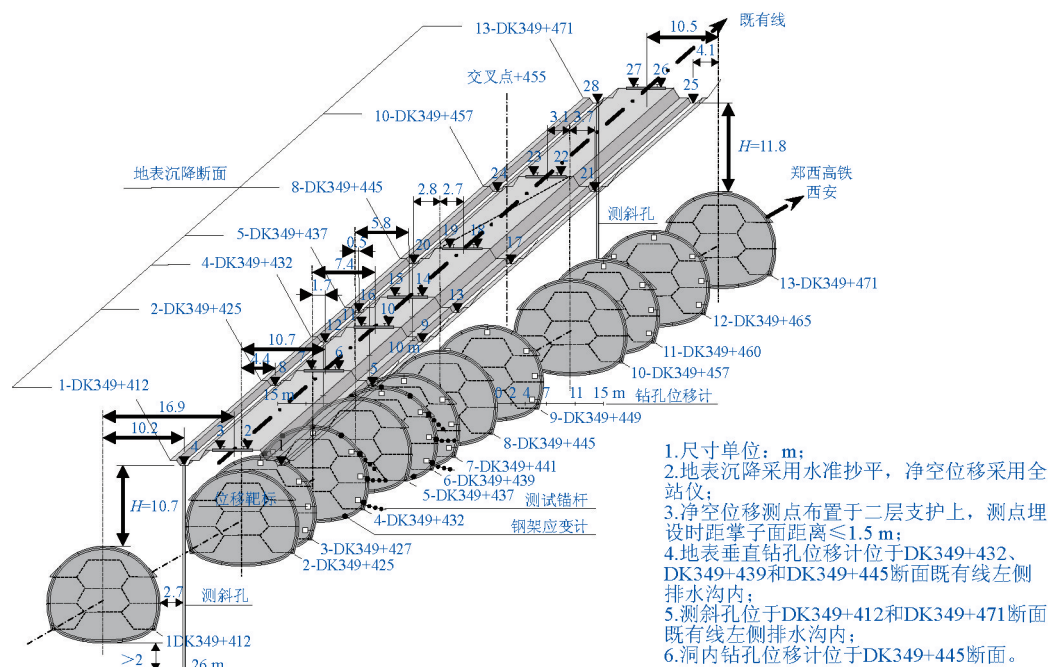


图4 高桥隧道下穿段试验测试布置图

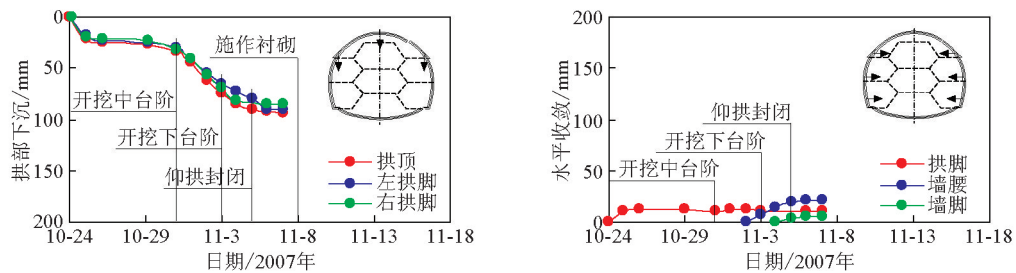
Fig. 4 The layout of measurements of the under-crossing section in Gaoqiao tunnel

表2 高桥隧道下穿段台阶法双层支护净空位移及速率最大值汇总表

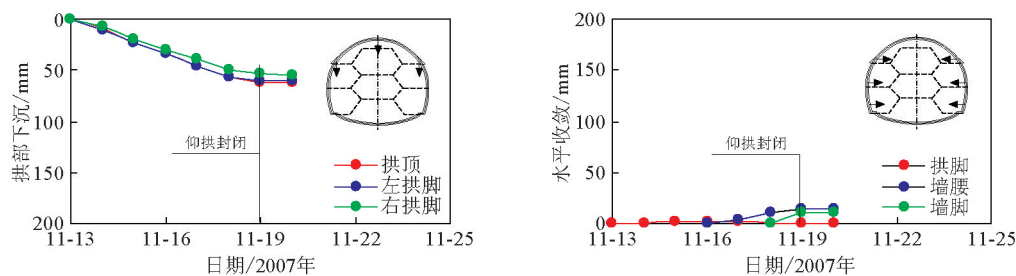
Table 2 Summary table of displacement and its rate of double-layer support by benching method in the under-crossing section of Gaoqiao tunnel

测试断面	埋深/m	拱部下沉/mm		下沉速率 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	水平收敛/mm			收敛速率 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)
		拱顶	拱脚		拱脚	墙腰	墙脚	
DK349+427	11.1	93	90	20.6	11	21	6	11.5
DK349+432	11.1	55	58	19.3	5	10	0	8.9
DK349+439	11.3	63	60	13.6	2	15	11	10.5
DK349+441	11.3	54	51	13.6	1	15	11	10.7
DK349+449	11.4	61	56	13.9	-9	6	5	6.1
DK349+460	11.6	50	47	13.7	2	6	4	4.0
DK349+465	11.7	68	65	10.0	-11	7	11	5.8

注:DK349+427断面二层支护落后一层3榀,其余断面落后1榀(榀距0.5~0.6 m)。仰拱封闭距离为8~16 m,封闭时间为13~24 d



(a) 二层落后一层3榀(DK349+427)



(b) 二层落后一层1榀(DK349+439)

图5 台阶法双层支护净空位移时态曲线

Fig. 5 Time curves of displacement of double-layer support by benching method

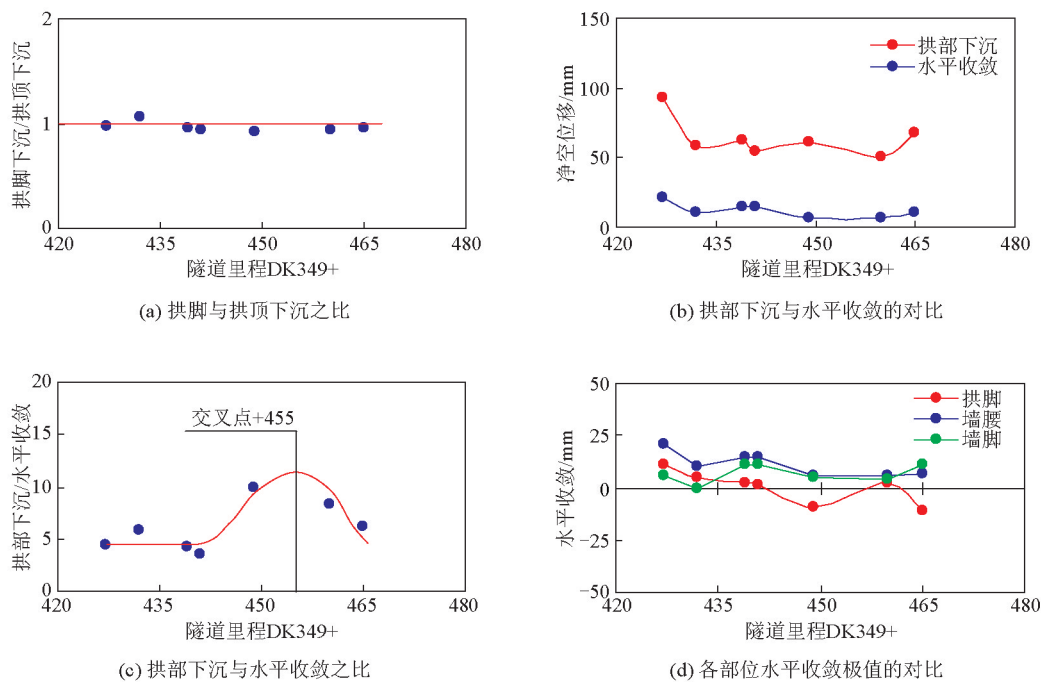


图6 下穿段台阶法双层支护净空位移特性统计图

Fig. 6 Statistics on displacement characteristics of double-layer support by benching method in the under-crossing section

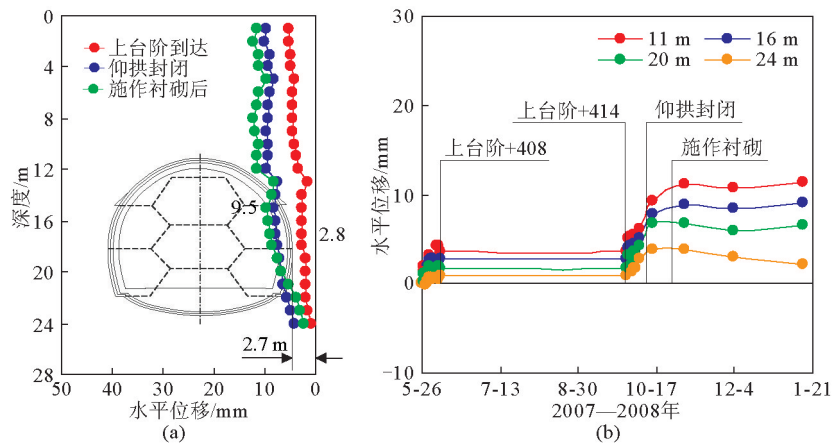


图7 测斜孔测试结果(DK349+412)

Fig. 7 Measurement result of the inclinometer borehole (DK349+412)

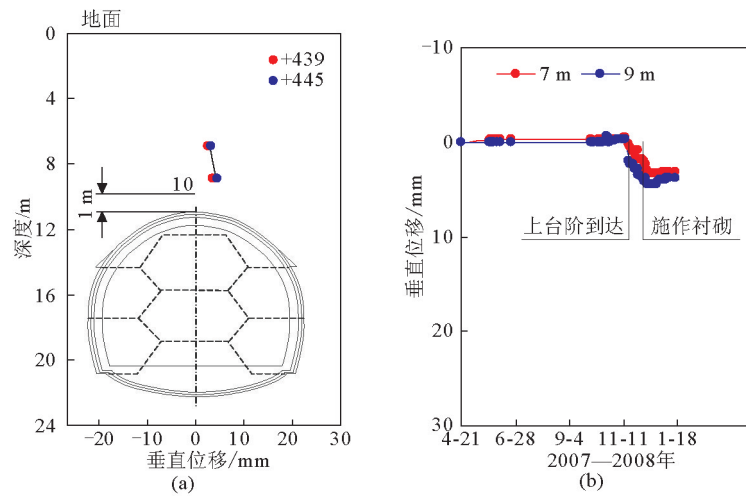


图8 地表垂直钻孔位移测试结果(DK349+439、DK349+445)

Fig. 8 Measurement result of displacement by vertical drilling on surface (DK349+439、DK349+445)

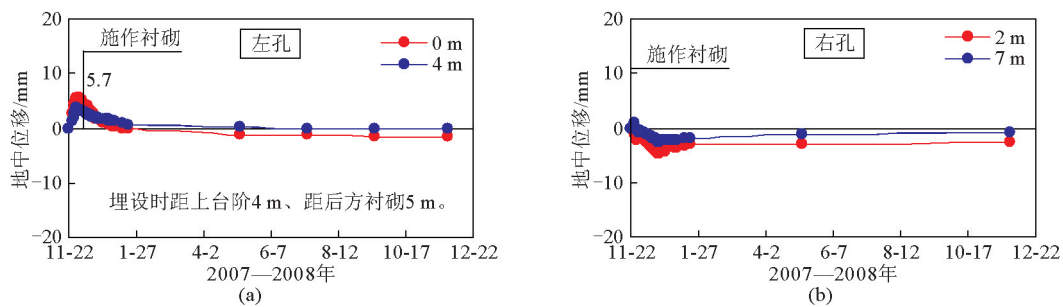


图9 洞内边墙水平钻孔位移计测试结果(DK349+445)

Fig. 9 Measurement result of displacement by horizontal drilling to sidewall in tunnel (DK349+445)

3.1.3 地表沉降

如图10、图11所示,在埋深 <1 倍隧道开挖宽度的特浅埋新黄土条件下,高桥下穿段台阶法双层

支护地表沉降槽深度133 mm,沉降槽半宽度为15 m(等于1倍隧道开挖宽度),地表最终沉降大于洞内拱部下沉(开挖阶段地表沉降略滞后于拱部下

沉,见图 10b),特浅埋新黄土中开挖引起的拱部地层整体沉降和重固结压缩沉降显著(开挖后黄土水

分向临空面迁移引发)。

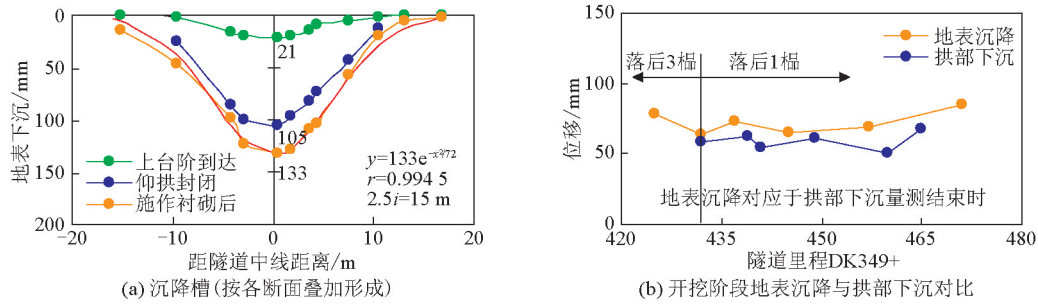


图 10 下穿段台阶法双层支护地表沉降特性

Fig. 10 Characteristics of surface settlements by benching method with double-layer support in under-crossing section

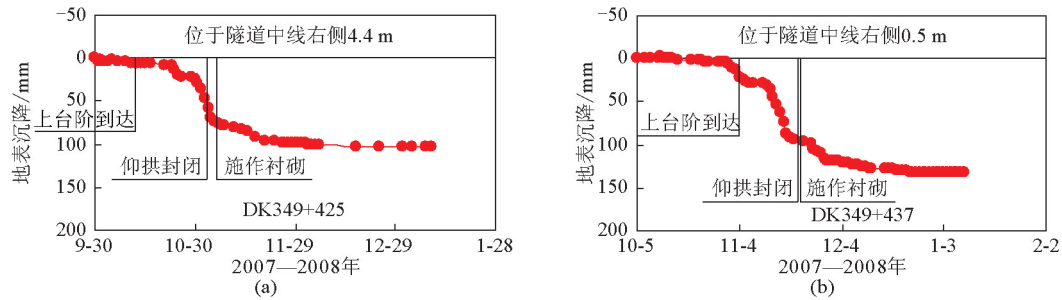


图 11 地表沉降时态曲线

Fig. 11 Time curves of surface settlements

3.2 支护受力特性

3.2.1 型钢应力

测试显示(见图 12),开挖阶段双层支护外层 I25a 型钢应力远小于同规格型钢的双侧壁法、交叉

中隔壁法和单层支护台阶法^[3],显然此时结构受刚度控制。相对上述工法,台阶法双层支护提供了一种强度和刚度更大的初期支护形式。

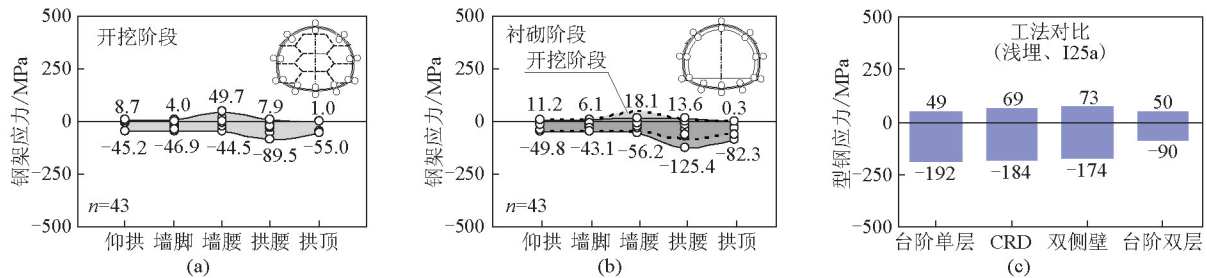


图 12 台阶法双层支护外层型钢(I25a)应力极值统计及对比

Fig. 12 Statistics and contrasting on the stress extrema of steel ribs (I25a) by benching method with double-layer support

3.2.2 锚杆轴力

测试显示(见图 13),边墙范围锚杆开挖阶段最大受拉轴力仅 5 kN,与单层支护短锚杆受力情况相

似,在浅埋新黄土中台阶法双层支护短锚杆受力效果同样较差,建议此时锚杆长度不小于 4 m。

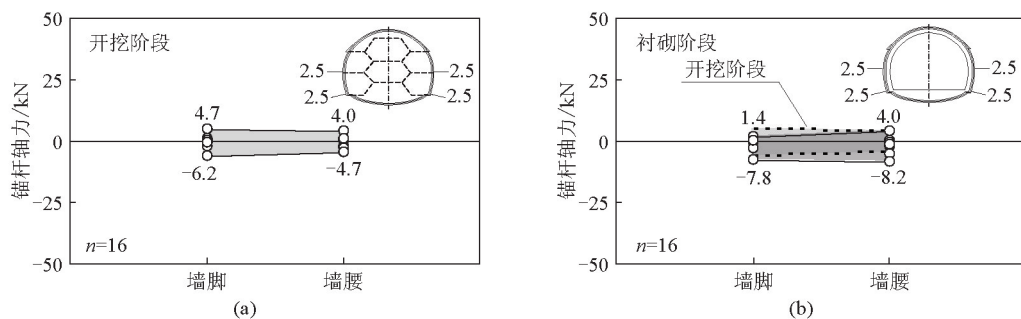


图 13 锚杆轴力极值沿断面分布统计图

Fig. 13 Statistics on axial-force extrema of system bolts along cross section

3.2.3 锁脚锚杆与大拱脚的承压效果

如图 14、图 15 所示,在锁脚锚杆和大拱脚的承压效果上,单层支护 > 双层支护。综合而言,在台阶法开挖对拱脚的扰动上,双层支护对拱脚的影响没有单层支护明显。

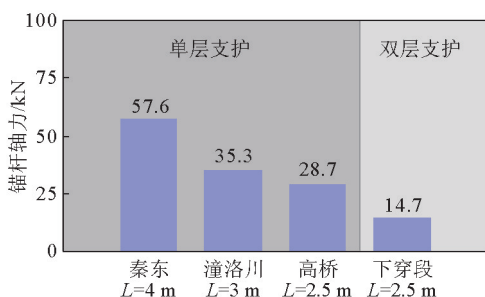


图 14 锁脚锚杆轴力极值对比

Fig. 14 Contrasting of axial-force extrema of lock-footing bolts

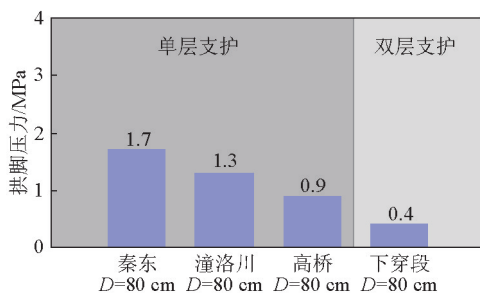


图 15 大拱脚压力极值对比

Fig. 15 Contrasting of pressure extrema of large arch footings

4 台阶法双层支护施工技术关键

4.1 封闭距离与时间

在大断面黄土隧道台阶法中,支护只有及时闭合成环才能有效提供刚度来控制变形,而支护及时

封闭的意义,在于支护尽量靠近掌子面封闭,并且越靠近掌子面封闭,对掌子面的稳定性就越有利^[2-4]。对于埋深 ≤ 1 倍隧道开挖宽度的特浅埋情况,双层支护台阶法的仰拱封闭距离应 ≤ 1 倍隧道开挖宽度。对于封闭时间,按高桥隧道下穿段经验,控制在 20 d 内即可。

4.2 双层支护的施作

根据力学特性测试,双层支护要求二层支护紧跟一层同时施作,才能达到及时增加支护刚度有效控制下沉的目的。按高桥隧道下穿经验,二层支护滞后一层的距离可控制在 1.5 m 以内。

4.3 掌子面的稳定

对于埋深 ≤ 1 倍隧道开挖宽度的特浅埋黄土,应特别重视掌子面的稳定性。开挖时,应确保掌子面后方核心土体积,并要求每层台阶均预留核心土,同时应采取掌子面超前加固辅助措施稳定前方核心土。

4.4 辅助措施

1) 在浅埋下穿场合,大断面黄土开挖面失稳很容易引发直通地表的坍塌而殃及地面构筑物。因此,浅埋下穿段应采取有效的防坍措施。其中,管棚是防止通顶坍方的有效手段。根据高桥隧道下穿经验,采取双层管棚增大管棚刚度,可有效减小开挖对地表的影响。同时,应施作超前小导管。实践显示,在拱部 120° 范围施作超前小导管,对于提高掌子面的稳定性具有明确的效果,尤其是黄土隧道取消拱部锚杆的场合。

2) 在下穿既有铁路时,对既有线轨面控制应满足《铁路轨道工程质量检验评定标准》(TB 10413—2003)规定的 30 mm 沉降限值要求,但目前工法对地表沉降控制很难直接达到该标准要求。因此,必须采取相应辅助措施,如设置扣轨梁、起道调平等。

4.5 浅埋大断面黄土隧道台阶法双层支护技术适用参数

表3给出浅埋大断面黄土隧道台阶法双层支护

技术推荐参数表,用于特浅埋新黄土以及下穿地段采用挖掘机的开挖环境,下穿段月施工速度可达到25 m以上。

表3 浅埋大断面黄土隧道台阶法双层支护技术推荐参数表

Table 3 Recommended parameters of benching method with double-layer support for large-section loess tunnels in shallow

施工		参数
施工图式		
施工参数	开挖模式	三台阶预留核心土顺序开挖
	核心土	每台阶均预留核心土并加大上台阶核心土尺寸,其顶面长度和宽度5 m,顶面净空高度1.7 m
	台阶长度	控制条件:上台阶长度不小于5 m,各层台阶长度之和等于仰拱封闭距离
	仰拱封闭	距离 时间 ≤1.0倍隧道开挖宽度 ≤20 d
	双层支护施作	二层支护紧跟一层同时施作,滞后距离不大于1.5 m
	一次开挖进尺	上、中台阶0.5 m,下台阶不大于1 m
	大拱脚	参照单层支护台阶法设置 ^[2]
支护参数	超前支护	超前小导管,必要时管棚;下穿段管棚采用双层交错布置
	钢架	一层支护 I25a型钢, 榫距0.5 m; 二层支护 I22a型钢, 榫距0.7 m
	锁脚锚管	参照单层支护台阶法设置
	系统锚杆	不设拱部锚杆 ^[2] , 边墙(含拱脚)锚杆长度4 m, 采用药包锚固

5 应用效果

高桥隧道下穿段台阶法双层支护采用三台阶预留核心土开挖,每层台阶预留核心土,图16为实际开挖情形。仰拱实际封闭距离为6~20 m,平均为12 m;封闭时间为6~25 d,平均为17 d(见图17)。

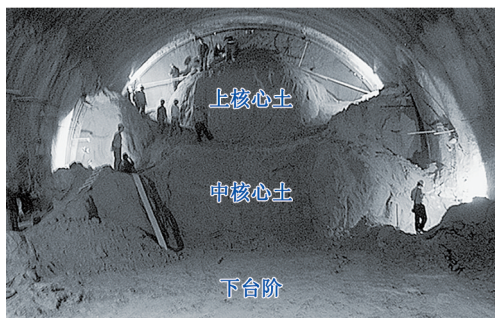


图16 高桥下穿段台阶法开挖情形

Fig. 16 Excavating by benching method in the under-crossing section of Gaoqiao tunnel

从2007年9月正式开挖,郑西高铁首次在大断面黄土隧道采用台阶法双层支护经过开始阶段的磨合,施工速度逐渐提高,在仰拱及衬砌紧跟情况下,11月下穿既有铁路时的月开挖进度达到25 m以上(见图18)。通过对既有轨面监控,在既有线保持运营条件下(限速40 km/h),开挖期间轨面控制最大隆起-10 mm、沉降25 mm(见图19),满足TB 10413—2003评定标准要求^[5]。

6 结语

大断面黄土隧道台阶法双层支护采用三台阶预留核心土顺序开挖,初期支护采用双层支护,目的是加强掌子面的开挖稳定性和增加支护刚度,有效控制浅埋以及下穿段大跨隧道拱部下沉及地表沉降。郑西高铁高桥隧道采用台阶法双层支护在埋深仅11 m < 1倍隧道开挖宽度的特浅埋砂质新黄土层以小角度下穿既有南同蒲铁路的实践,为大断

面黄土隧道下穿构筑物的施工技术提供了成功的经验。

相对双侧壁法、交叉中隔壁法等工法,台阶法双层支护提供了一种强度和刚度更大的初期支护结构形式,用钢量比双侧壁节省,且无需临时支护,

施工较为快捷。对于高铁超大断面黄土隧道,在埋深 ≤ 1 倍隧道开挖宽度的特浅埋地段,双层支护台阶法的月开挖进度可以达到25 m以上,其技术经济效益显而易见。

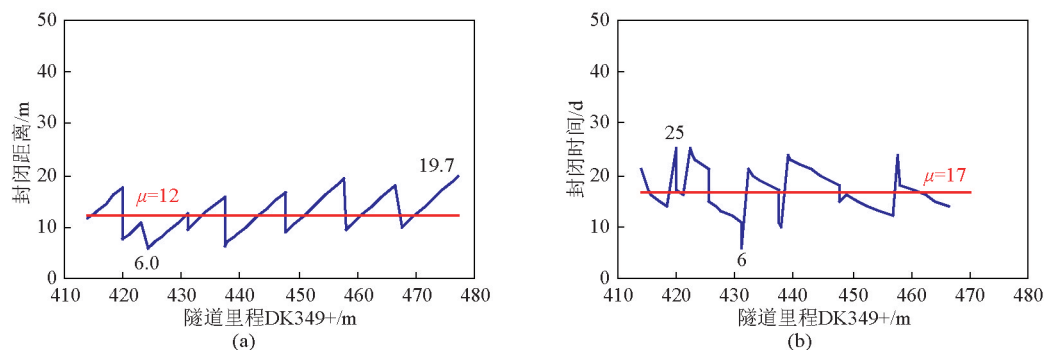


图 17 仰拱实际封闭距离和时间的统计

Fig. 17 Statistics on the actual closure distance and time of invert arch

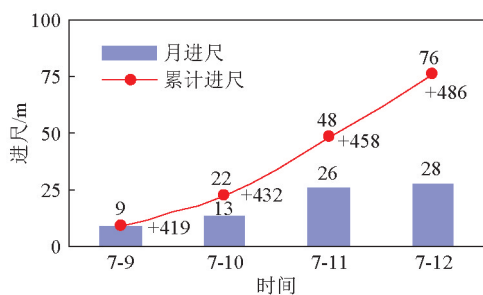


图 18 高桥下穿段双层支护台阶法开挖月进度

Fig. 18 Monthly progress of benching method with double-layer support in the under-crossing section of Gaoqiao tunnel

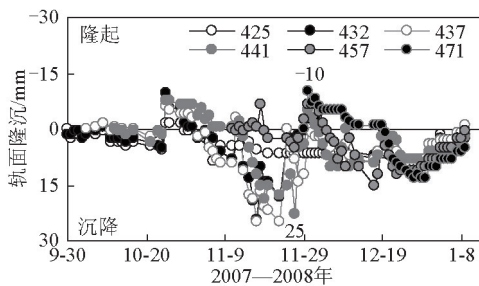


图 19 既有线轨面隆沉监控结果

Fig. 19 Monitoring result of rail settlements of the existed railway

因此,台阶法双层支护可用于埋深 ≤ 1 倍隧道开挖宽度的特浅埋非饱和黄土以及下穿段大断面隧道施工。但用于下穿既有铁路时,为满足《铁路轨道工程质量检验评定标准》(TB 10413—2003)要求,还需要对线路采取相应辅助措施如设置扣轨梁、起道调平等,并进行轨面监控。

参考文献

- [1] 王晓州,丁维利,王庆林,等. 浅埋大断面黄土隧道下穿既有铁路施工技术[J]. 铁道标准设计,2007(S1):67-71.
- [2] 中铁第一勘察设计院集团有限公司,中铁西南科学研究院有限公司,西南交通大学,等. 郑西客专大断面黄土隧道施工方法与监控技术研究报告[R]. 西安:中铁第一勘察设计院集团有限公司,2008.
- [3] 中铁西南科学研究院有限公司. 郑西客运专线大断面黄土隧道施工方法与监控技术研究——力学特性现场测试报告(西南研字第580号)[R]. 成都:中铁西南科学研究院有限公司,2008.
- [4] 李国良,宋冶,李雷,等. 郑西高铁大断面黄土隧道施工方法研究[C]// 第七届世界高速铁路大会论文集(上册). 北京:中国铁道出版社,2010:43-50.
- [5] 宋冶,王新东,王刚,等. 客运专线大断面黄土隧道施工监控技术[J]. 铁道工程学报,2010(1):52-58.

Double-layer support technology of large-section loess tunnel by benching method

Li Guoliang¹, Song Ye², Li Lei¹, Wang Xindong¹, Li Bo²

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an 710043, China;

2. China Railway Southwest Research Institute Co. Ltd., Chengdu 610031, China)

[Abstract] Relying on the construction under crossing the existed south Tongpu Railway with a small included angle at Gaoqiao tunnel of Zhengzhou—Xi'an high speed rail, carrying out the test and study, the mechanical characteristics and key construction techniques of the double-layer support system of large-section loess tunnels by benching method are acquired. It successfully resolved the construction difficulties of super-large-section tunnel (171 m²) under crossing the operating railway in the depth of only 11 m under sandy neoloess, thus to have the significant reference for the design and construction of the similar engineering.

[Key words] large-section loess tunnel; benching method; double-layer support; under crossing