

软岩浅埋连拱隧道施工围岩变形特征分析

罗燕平¹,刘得第²,王生¹,曾斌¹,邱军领^{2*},赵文财²

(1. 四川川交路桥有限责任公司,四川 广汉 618300;2. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要: 为研究软弱破碎围岩浅埋连拱隧道施工过程中围岩变形特性,依托陕北某连拱隧道实际工程,通过现场布设监测仪器系统开展了拱顶沉降、围岩变形长期测试,获得了随施工过程拱顶沉降及围岩径向变形规律。结果表明:地表沉降近似于 Peck 沉降曲线,越靠近隧道中心地表沉降越大,最大沉降值产生于左线隧道开挖落底后,约为 12.1 mm;拱顶沉降沿隧道纵向变化规律为:中导洞>正洞>左右侧导洞,中导洞表现为拱顶下沉,侧导洞则是水平收敛,上台阶施工因未临时仰拱封底而其收敛变形显著大于下台阶施工;随距隧道壁面距离增加,测点累计变形量逐渐减小,K21+970 测试断面围岩松动区约 2 m,因测线布置限制,K21+970 测试断面松动区超过 4 m。

关键词: 公路隧道;围岩变形特征;现场试验;软弱围岩;连拱隧道

中图分类号: U455

文献标识码: A

Deformation Characteristics of Surrounding Rock During Construction of Shallow Multi Arch Tunnel with Soft Rock in Seasonal Frozen Area

LUO Yanping¹, LIU Dedi², WANG Sheng¹, ZENG Bin¹, QIU Junling^{2*}, ZHAO Wencai²

(1. Sichuan Chuanjiao Cross Road & Bridge Co., Ltd., Guanghan, Sichuan 618300, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: Based on the actual project of a multi arch tunnel in Northern Shaanxi, to study the deformation characteristics of surrounding rock during the construction of shallow buried multi arch tunnel with weak and broken surrounding rock, the long-term tests of vault settlement and surrounding rock deformation were carried out by laying certain monitoring instrument on site, while the laws of vault settlement and surrounding rock radial deformation during the construction process were obtained. The results show that: the surface settlement is similar to peck settlement curve. The closer to the center of the tunnel, the greater the surface settlement is. The maximum settlement value is about 12.1 mm after the excavation of the left tunnel, and the variation of vault settlement along the longitudinal direction of tunnel is as follows: middle pilot tunnel > main tunnel > left and right pilot tunnel. The middle pilot tunnel shows a vault settlement, while the side pilot tunnel shows a horizontal convergence. The convergence deformation of the upper step construction is significantly greater than that of the lower step construction because of no temporary invert bottom sealing. With the increase of the distance from the tunnel wall, the cumulative deformation of the measuring point decreases gradually. The surrounding rock loose area of K21+970 test section is about 2 m, and the loose area of K21+970 test section is more than 4 m due to the limitation of the layout of the measuring line.

收稿日期:2022-07-15

基金项目:四川公路桥梁建设集团有限公司技术开发(委托)项目(220221210155);交通运输部应用基础项目(2015319812140);陕西省重点研发计划项目(2020SF-428)

作者简介:罗燕平(1983-),男,四川广汉人,硕士,工程师,主要从事隧道工程相关工作。

* 通讯作者:邱军领(1989-),男,山东潍坊人,博士,讲师,主要从事隧道的教学和研究工作。

Key words: highway tunnel; deformation characteristics of surrounding rock; field test; weak surrounding rock; multi-arch tunnel

连拱隧道结构形式布线简单,线形流畅,克服了线路两侧区域的地形差异而利于线路规划^[1],显著提高了空间利用率,减少在洞口段范围内增设路基或者桥梁,同时兼顾了地形要素、环保和建设需求^[2],但开挖工序繁多,一侧施工扰动必然会对邻近洞室隧道围岩及支护结构产生不利影响,尤其在不良地质条件下更易造成围岩的多次扰动,从而使得隧道结构的受力体系转换复杂,对施工技术水平要求和支护设计较高^[3]。

目前对连拱隧道施工力学特性在理论分析、数值模拟、模型试验、现场测试等方面进行了系统的研究,取得了大量实用的成果。在理论分析方面,丁文其等^[4]首次提出了连拱隧道围岩压力计算公式,但其局限性在于未能考虑中隔墙维持稳定作用;李鸿博等^[5]基于单洞隧道普氏理论并综合考虑了中隔墙主动支护压力,建立了深浅埋工况下连拱隧道围岩压力计算公式。在数值模拟方面,赵星^[6]借助 ANSYS 有限元软件验证了连拱隧道单洞开挖工法可靠性,结果证明 SWD 工法施工结束时最大沉降为 2.5 cm,在围岩破碎发育地区可有效约束变形发展;季毛伟等^[7]建立了真实地形条件下浅埋偏压连拱隧道施工模型,对比分析了三导洞、中导洞施工时围岩应力场、位移场及中隔墙受力特点,综合认为围岩等级较高时中导洞施工方案更有优势。在模型试验方面,刘涛等^[8]设计了缩尺比为 1:100 的地质力学模型试验,研究了连拱隧道开挖全工况过程中围岩变形及径向围岩压力发展规律;刘新荣等^[9]模拟了中导洞开挖过程中黄土隧道围岩压力、变形及压力拱发展演化规律,指出相较于其他同等级的围岩,黄土地区修建连拱隧道时更容易形成更大范围的压力拱。针对连拱隧道施工现场监控量测,邱明明等^[10]基于实际工程,通过现场监测数据分析了不同施工方案下隧道支护结构响应规律,提出了抑制浅埋偏压大跨连拱隧道变形的工程措施;杨学奇等^[11]通过分析浅埋大跨双连拱隧道的围岩大变形特征,提出了适用于不良地质条件下双连拱隧道施工的工程措施。现阶段在黄土地区应用连拱隧道的设计案例相对较少,个例研究中取得的经验和研究成果尚不完全具备多

数工程案例的施工设计,因此开展不良地质浅埋连拱隧道现场测试对提升其减灾防灾能力非常必要^[12]。

陕北某黄土连拱隧道地处褶皱带,节理发育、岩体破碎,而且隧道上方过境道路通过,易受动荷载扰动影响。以该隧道实际工程背景为依托,采用现场实测研究施工全过程中围岩变形特性,从而丰富连拱隧道受力规律的研究成果,为连拱隧道支护体系的施工优化提供借鉴和参考。

1 工程概况

依托工程起终点里程为 K21+945—K22+051,隧道全长为 106 m,为上下行分离式连拱隧道,如图 1 所示。该隧道位于垭口处,埋深 4~16 m,属超浅埋。隧道上覆围岩为第四系的马兰黄土、离石黄土,土质较疏松、破碎,具大孔隙与垂直节理发育特性,洞身围岩以由灰色—灰绿色的泥质页岩构成主体,围岩完整性及稳定性较差,可判定为 V 级围岩。

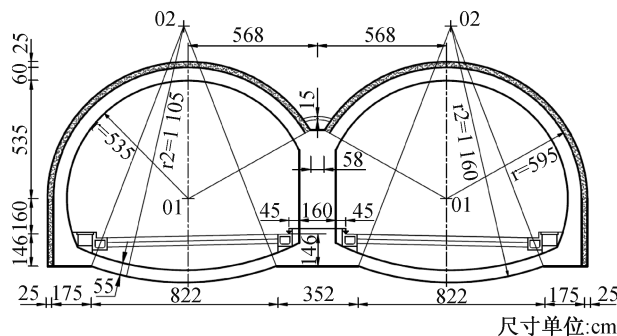


图 1 隧道断面轮廓图

Fig. 1 Tunnel section outline graph

该隧道设计采用三导洞施工方案,施工流程如图 2 所示。中隔墙设计为直中墙,直中墙由 200 cm 的混凝土浇筑而成,隧道支护体系采用复合式衬砌,即 $\Phi 22$ 早强砂浆锚杆[直径 22 mm,长 2.5 m, @ 600 mm×400 mm(环向×纵向)]、型钢拱架[$I 20$,间距为 0.5 m]、钢筋网片[直径 6 mm,间距 150 mm×150 mm]等组成,采用厚度 40 cm 的 C25 标号模筑砼作为二次衬砌的工程材料,为确保支护结构的防水性,在二衬和初支之间施作 PVC 材料的复合式防水板,采用 $\Phi 50$ 大管棚进行隧道超前支护。

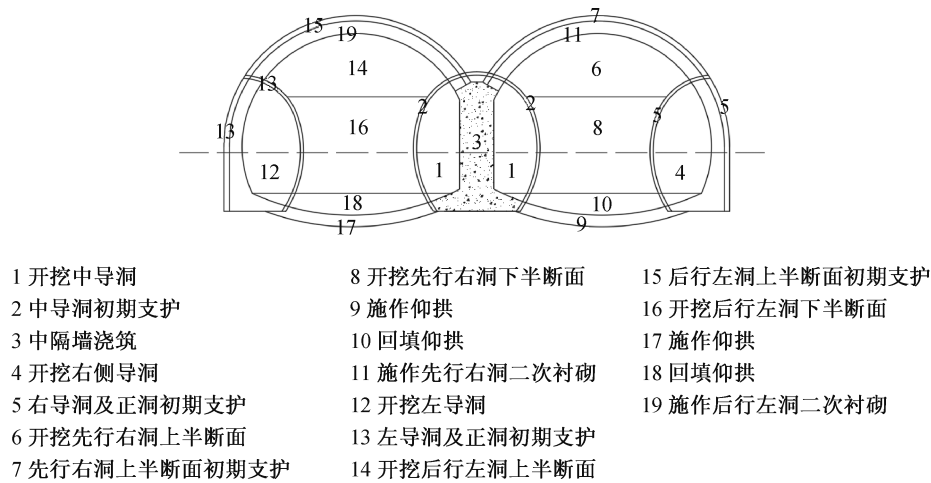


图 2 三导洞工法施工流程

Fig. 2 Construction process of three guide tunnel excavation method

2 围岩变形特性现场监测试验方案

为了监测隧道施工过程中的地表变形规律,选定 K21+970、K22+020 两个断面作为监测断面,采用精密的水准仪器将施工观测点布设于临空面潜在坍塌风险的地表位置。考虑到水准测量基点对计算准确性的误差影响,以隧道可能下沉断面处为中心,4 倍隧道洞径长度为距离布设水准基点,以此作为基准获得各个测点的高程结果,通过计算前后的量值差,得到开挖过程中各观测点的沉降值。隧洞上方地表沉降测点在中导洞中线两侧均匀布置,拱顶沉降、周边收敛及围岩内部位移测点布置情况和多点位移计的现场安装情况分别见图 3、图 4 所示,每天监测一次,直至数据基本稳定^[13]。

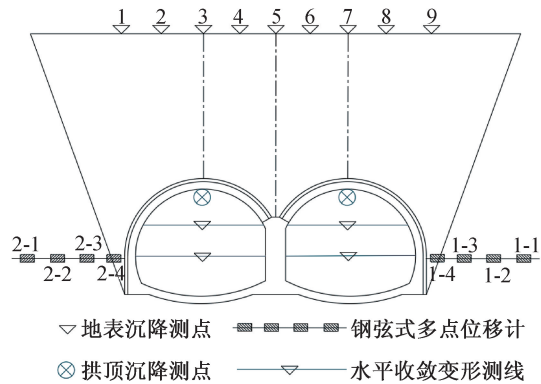


图 3 沉降及收敛变形测点及测试元件布置

Fig. 3 Layout of settlement and convergence deformation measuring points and measuring elements



图 4 多点位移计安装

Fig. 4 Installation of multipoint displacement meter

3 现场测试结果分析

3.1 沉降测试结果分析

3.1.1 地表沉降测试结果

图 5 所示为不同施工阶段时地表沉降现场测试成果,监测断面处隧道上方地表沉降与施工工序密切相关,右线隧道开挖时地表沉降速率显著增大,特别是隧道主洞下台阶及仰拱开挖时隧道上方地表沉降速率增长较快,因此在施工中一定要及时施作仰拱,使隧道尽可能快速封闭成环,另外可以看出左线隧道开挖施工步骤影响较大。通过观察图 5 中 a、b 两条曲线可以发现,在开挖初期,地表的变形主要都集中在中导洞和双洞隧道拱顶正上方处的围岩,沿测点走向,地表沉降先增大后减小,呈现为均匀的漏斗状曲线,与 Peck 公式描述的曲线接近,至二次衬砌施工完成时地表沉降已经趋于稳定。随着施工的进行(图 5 曲线 c、

d),左右线拱顶对应地表沉降增幅较其他位置大,落底开挖后(图5曲线e、f)地表沉降继续增加,左线主洞施工完成后其拱顶对应地表沉降值最大,约为12.1 mm。同时可以看出右线隧道(先行洞)上方最大地表沉降均比左线隧道(后行洞)上方最大地表沉降较大,这是由于右线隧道(先行洞)先行施工,左线隧道(后行洞)施工时造成的围岩扰动产生叠加效应。地表沉降主要产生在左右线拱顶范围内,但地表沉降较小,稳定性较好,说明采用的施工方法及支护参数设计合理,确保了隧道顶部过境道路安全通行。

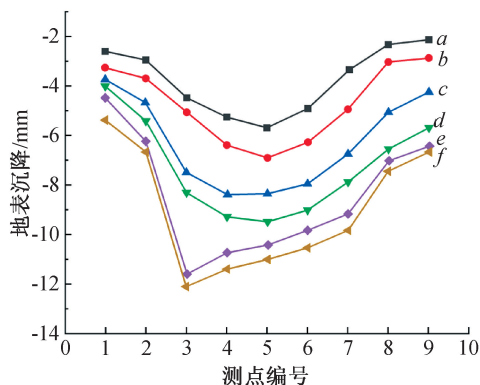


图5 不同施工阶段地表沉降

Fig. 5 Surface subsidence at different construction stages

3.1.2 拱顶沉降测试结果

拱顶沉降沿隧道纵向分布如图6所示,隧道进口与出口处拱顶沉降最终沉降相对较小,其余位置处均较大,这是由于进出洞口处围岩均较为破碎;随着距洞口距离增加,拱顶最终沉降逐渐增大,距洞口75 m位置处,这是由于该位置处隧道埋深较大,沉降随埋深的增大而逐渐增大,表现出浅埋隧道的特征。

三个导洞变形统计结果如表1所示,中导洞竖向位移量最大,其次为正洞拱顶沉降,左右侧导洞顶部沉降最小。中导洞拱顶沉降较周边收敛大,主要表现为拱顶部位的沉降,左右侧导洞周边收敛较顶部沉降大,受侧导洞结构形状狭长,高宽比

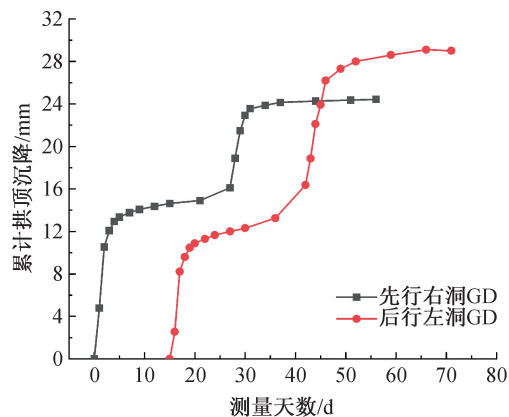


图6 断面 K175+970 拱顶累计沉降曲线

Fig. 6 Arch crown cumulative settlement curve of section K175+970

较大的影响,侧导洞主要表现为水平收敛变形。监测结果表明上台阶收敛大于下台阶,其原因是导洞的施工采用的临时上下台阶法工艺,在进行上台阶施工时并没有用临时仰拱封底。

拱顶累计收敛沉降选取 K175+970 断面进行分析,如图7所示,拱顶沉降产生两次突变,当向监测断面附近的掌子面开挖时,拱顶沉降迅速增大呈线性增长,沉降速率较快,先行洞与后行洞累计拱顶沉降分别约为14、12 mm,约占最终累计沉降的58%、43%;随着远离监测断面,施工掘进对监测断面拱顶沉降影响较小并逐渐趋于平稳,下半断面开挖时拱顶沉降再次产生突变,同时当仰拱封闭成环以后,拱顶累计沉降量逐渐趋于稳定;同时也可以看出先行右洞的累计沉降量大于后行左洞拱顶累计沉降量,先行左洞与后行右洞的累计拱顶沉降量的平均值为16.75、16.64 mm,因此应该注意及时使仰拱封闭成环可有效控制隧道拱顶沉降发展,此时支护结构已经趋于稳定。

3.2 隧道结构变形结果分析

3.2.1 支护结构收敛变形分析

支护结构水平收敛变形历时曲线选择 K21+970 断面进行分析(正值表示向洞内收敛,负值表

表1 三个导洞变形统计结果

Tab. 1 Statistical results of deformation of three pilot holes

位置	拱顶沉降/mm		周边收敛/mm			
			上测线		下测线	
	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
左导洞	17.8	19.1	35.3	41.4	16.8	26.5
右导洞	17.6	18.5	12.3	21.5	8.6	18.7
中导洞	23	23.9	34.6	43.2	17.1	28.4

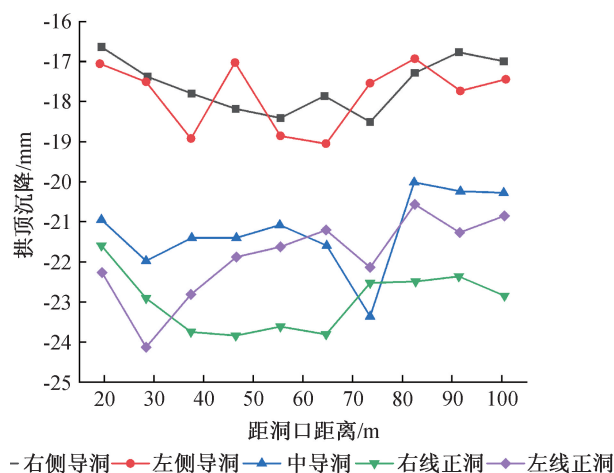
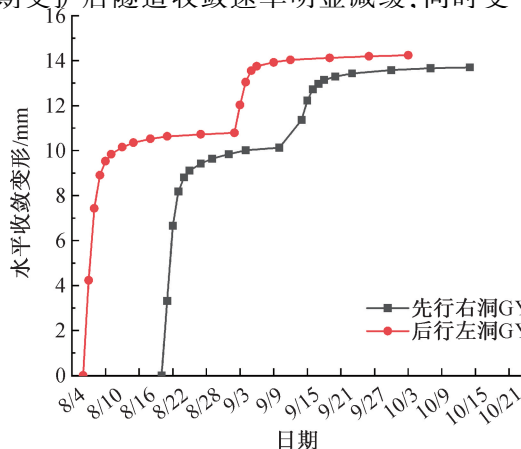


图7 拱顶最终沉降纵向分布

Fig. 7 Longitudinal distribution of final settlement of vault

示向洞外扩张),如图8所示,在依托工程隧道施工过程中,支护结构变形均为正值,在上断面拱腰处先行右洞的收敛变形略小于后行左洞的收敛变形,先行右洞的收敛变形平均值为10.76 mm,后行左洞的收敛变形平均值为10.24 mm;在下断面边墙处先行右洞的收敛变形大于后行左洞的收敛变形,先行洞的收敛变形平均值为9.76 mm,后行洞的收敛变形平均值为7.24 mm,这是由于隧道会产生向先行动一侧产生偏压作用,从而导致中隔墙产生偏转而使支护结构受力不均匀,因此施工中应该注意避免不对称施工造成的偏转问题。

另外从图8也可以看出,先行右洞水平累计收敛在5 d后逐渐趋于稳定,后行左洞水平累计收敛变形在12 d后逐渐趋于稳定,随着距掌子面距离增加,K21+970断面随着隧道左右线主洞开挖,当右洞上断面进行开挖时,水平收敛速率明显加快,施作初期支护后隧道收敛速率明显减缓,同时受



(a) 拱腰收敛变形

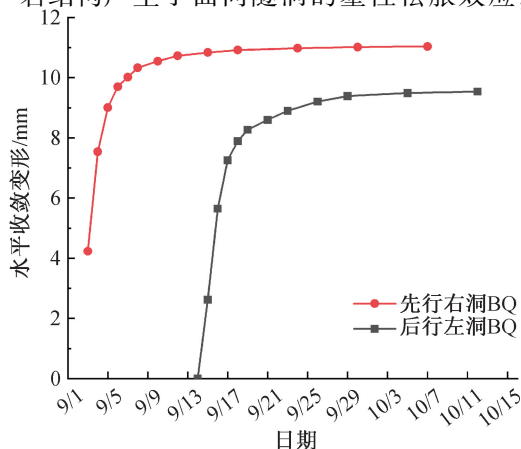
左线主洞上断面开挖的影响,收敛变形随施工进度逐渐增大,至左线上断面支护施作时,收敛速率又开始趋于平稳。左洞水平收敛变形规律与右洞水平收敛变形规律基本相似。可以看出,隧道断面累计水平收敛因右洞开挖与支护而显著增加,相较于右洞的开挖引起的收敛变形的增加,右洞上断面支护引起的累计收敛变形增加更多,这是由于右线主动施加支护后相当于使中隔墙处于偏压荷载作用,从而导致右线主动累计收敛变形增长较快,从而侧面反映出中隔墙的偏转对隧道围岩变形极为不利,施工中应该尽量避免。

3.2.2 围岩内部变形测试结果

根据钢弦式多点位移计监测获得的围岩内部位移时程曲线见图9、图10,K21+970断面左右线多点位移计数值在埋设前期30 d逐渐增大,之后基本稳定,K22+020断面右线在埋设开始10 d急剧增长之后趋于稳定,K22+020断面左线增长时间约15 d。

需要说明的是,由于该地区8月初连续一周降雨,使K22+020断面监控量测数据出现异常增大,及时对监控量测数据进行综合分析,判定围岩变位和支护受力处于急剧变化状态,暂停施工,8月8日隧道出口一侧发生山体滑塌,右洞出口K22+030—K22+051段初期支护被摧毁。由于监控量测数据分析及时准确,使得这次塌方事故没有造成人员伤亡,损失降到了最低限度。

隧道的开挖对洞室附近的围岩产生了多次扰动,使得围岩结构的应力体系在开挖过程中发生了显著的变化,施工对隧道围岩的扰动破坏加剧了围岩结构的风化作用,在两者的双重作用下,围岩结构产生了面向隧洞的塑性松胀效应,降低了



(b) 边墙收敛变形

图8 K21+970断面围岩收敛变形曲线

Fig. 8 Convergence deformation curve of surrounding rock at K21+970 section

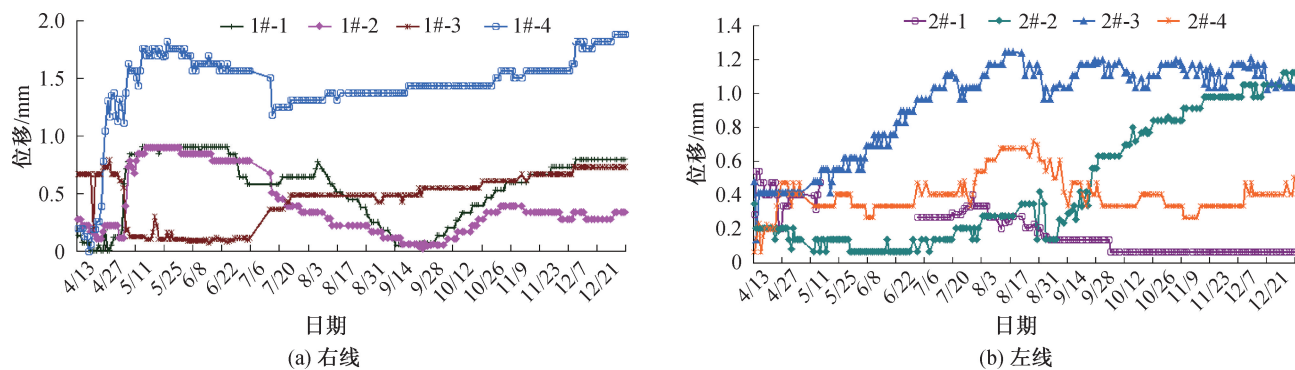


图9 K21+970断面围岩内部位移

Fig. 9 Internal displacement of surrounding rock of K21+970 section

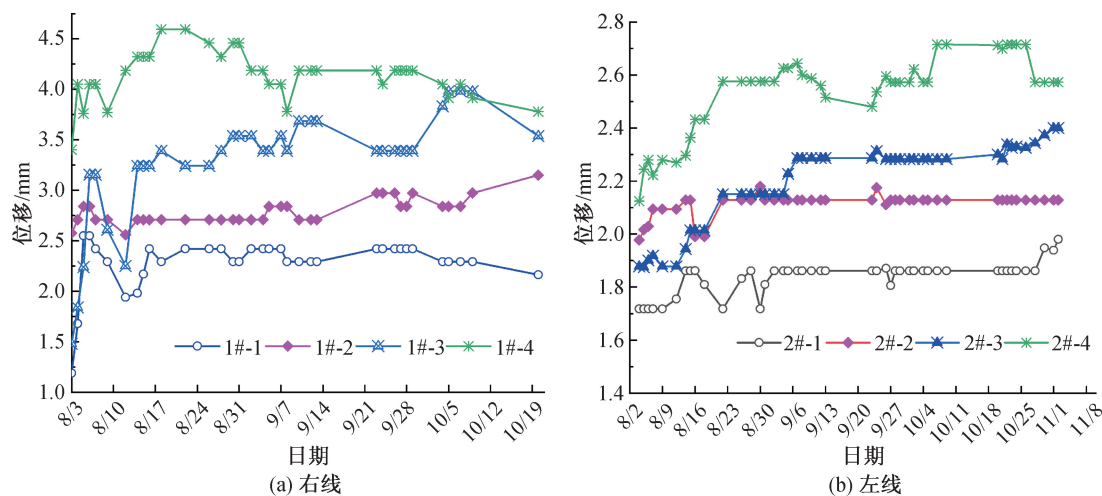


图10 K22+020断面围岩内部位移

Fig. 10 Internal displacement of surrounding rock of K22+020 section

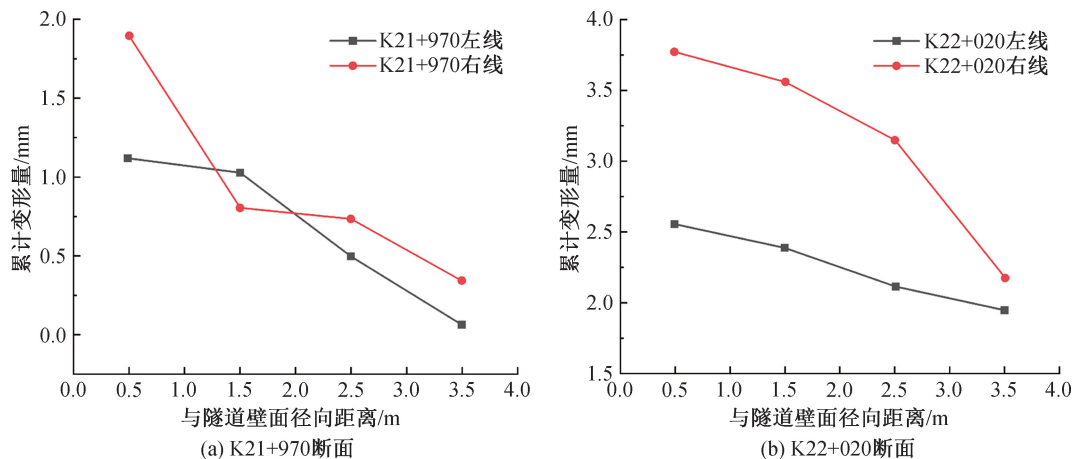


图11 测点累积变形量与径向距离关系

Fig. 11 Relationship between cumulative deformation of measuring points and radial distance

隧道附近围岩的承载性能,将应力逐渐传递至邻近岩体,不仅扩大了围岩的承载面,也在隧洞的结构周围产生了一定宽度的松动荷载区。不同测点间内部位移曲线的变化趋势不尽相同,而且在沉降变形趋于稳定状态后,其最终的位移量值也有较大幅度的差异,为了判断塑性松动荷载对围岩

结构的作用范围,根据位移计获得各测点的内部位移量值,结合各测点间埋设的横向距离进行判断。根据实测数据,以不同测点到围岩表面的深度距离为横轴,各个围岩测点的工后总沉降量为纵轴建立平面直角坐标系,绘制围岩位置变形曲线,如图11所示。根据曲线的斜率变化趋势将断

面划分为三个区域,即围岩松动显著区,围岩强度扰动区,围岩稳定区。由此可知越靠近隧道和围岩的接触表面,曲线的斜率陡峭,变位增幅剧烈,塑性松动荷载影响显著,随着距离深度的增大,变位增幅开始减缓,强度扰动区域的变位较大,达到一定深度后,围岩不发生显著变形,不属于扰动区。从图 11 可以看出,K21+970 断面松动区约为 2 m,K22+020 断面曲线斜率没有明显变化,由于现场测试采用多点位移计长度为 4 m,未能测得更深处围岩变位,说明该断面松动区超过 4 m。

4 结论

依托陕北某连拱隧道实际工程,通过现场测试研究了季冻区软弱围岩浅埋连拱隧道围岩变形特性,获得了典型测试断面随施工过程中拱顶沉降以及围岩径向测点累计变形距隧道壁面距离变化规律,主要得出以下结论:

1)典型测点施工全过程中地表沉降槽发展近类似于 Peck 沉降曲线,越靠近隧道中心地表沉降越大,最大沉降值产生于左线隧道开挖落底后,连拱隧道拱顶正上方沉降值约为 12.8 mm。

2)连拱隧道拱顶沉降沿隧道纵向变化规律为:中导洞>正洞>左右侧导洞,中导洞表现为拱顶竖向沉降,侧导洞则是周边围岩水平收敛,上台阶施工因未临时仰拱封底而其收敛变形显著大于下台阶施工。

3)随距隧道自由壁面距离增加,测点累计变形量逐渐减小,K21+970 测试断面围岩松动区范围距隧道壁面约 2 m,因测线布置长度限制,K21+970 测试断面松动区超过 4 m。

参考文献:

- [1] 刘树红,王 婷,吕 刚,等.京张高铁八达岭长城站大跨度深埋三连拱隧道设计及施工方法研究[J].铁道标准设计,2020,64(1):63-68.
- [2] 杨忠民,高永涛,吴顺川,等.节理岩体中纵向间距对连拱隧道稳定性的影响[J].中国公路学报,2018,31(10):167-176.
- [3] 瞿 永,郭 博,杨果林,等.连拱隧道中隔墙主应变监测方案分析研究[J].公路,2019,64(12):304-307.
- [4] 丁文其,王晓彤,朱合华,等.连拱隧道设计荷载的确定方法[J].中国公路学报,2019,20(5):78-82.
- [5] 李鸿博,郭小红.公路连拱隧道土压力荷载的计算方法研究[J].岩土力学,2009,30(11):3430-3434.
- [6] 赵 星.山区双连拱隧道单洞开挖 SDW 法施工技术研究[J].建筑结构,2021,51(S1):2346-2353.
- [7] 季毛伟,吴顺川,高永涛,等.双连拱隧道施工监测及数值模拟研究[J].岩土力学,2011,32(12):3787-3795.
- [8] 刘 涛,沈明荣,陶履彬,等.连拱隧道动态施工模型试验与三维数值仿真模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2006(9):1802-1808.
- [9] 刘新荣,刘 俊,黄伦海,等.黄土连拱隧道开挖的模型试验与压力拱分析[J].浙江大学学报:工学版,2018,52(6):1140-1149.
- [10] 邱明明,杨果林,张沛然,等.浅埋偏压对连拱隧道施工力学效应的影响及处治措施[J].科学技术与工程,2021,21(5):2061-2068.
- [11] 杨学奇,王明年,陈树汪,等.软弱地层的大断面双连拱隧道设计与施工方案优化研究[J].隧道建设:中英文,2019,39(S2):176-184.
- [12] 赖金星,余德强,冯志华,等.黄土连拱隧道支护结构力学特性现场试验[J].现代隧道技术,2017,54(5):180-191.
- [13] 杨果林,葛云龙,彭 伟,等.连拱隧道复合式曲中墙受力现场监测分析[J].华中科技大学学报:自然科学版,2019,47(1):55-59.

(责任编辑 周雪梅)