

## 背斜核部层状软硬岩区隧道变形时空效应分析

孙智慧<sup>1</sup>, 邢逸航<sup>2</sup>, 唐勇<sup>1</sup>, 刘涛<sup>1</sup>

(1.内江职业技术学院 土木工程系, 四川 内江 641000; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院)

**摘要:**背斜核部可能集岩体破碎、软硬相间、层状分布、高地应力、地下水等岩土工程问题于一体,加上软岩流变特性致使其围岩变形机制复杂。为了解复杂工区围岩变形规律,根据雅康高速公路周公山隧道背斜核部软硬岩区监控量测资料,对围岩变形时空效应进行了分析。结果表明:①最大接触压力位于断面K8+559拱顶部位,达760.7 kPa;最大变形位于断面K8+559拱顶部位,达760.7 mm;②时间上:围岩变形呈周期性,周期为14 d,初始4 d变形明显,4~8 d缓慢变形,8~14 d趋于稳定状态;且鉴于支护效力逐渐发挥,后期的变形量值及速率均小于前期的变形量值及速率;③空间上:沿开挖方向,越靠近背斜核部变形越大;同一断面上,边墙水平位移最大;④对软硬岩区隧道工程应充分考虑软岩的时效变形,合理选择支护时机和支护措施。

**关键词:**隧道工程;背斜;变形;时空效应;支护

随着“泛亚铁路网”、“川藏铁路”、“川藏高速公路”等西部大开发战略中重大工程的相继启动和实施,带动了中国西部交通运输工程蓬勃发展,隧道建设进入了新高潮。然而,中国西部地形地质条件复杂,地质环境非常极端和异常,隧道建设面临诸多严峻挑战。如隧道穿越背斜核部区域可能集围岩破碎、软硬相间、层状分布、地应力高、地下水等诸多不利因素于一体。且软岩流变性能更使隧道围岩变形复杂多变极易引起

掌子面掉块、塌方,初支开裂、脱落、拱架变形等现象,严重影响施工进度和施工安全。研究背斜核部区域隧道围岩变形时空效应,进一步掌握复杂工区围岩变形特征规律,积累相关资料,对西部隧道建设意义明显。

隧道时空效应研究主要基于现有时空效应理论,通过现场监测、室内试验以及数值模拟等方法进行。如,孙元春等认为隧道围岩变形存在3个阶段,且急剧变形阶段空间效应突出,稳定变形阶段是时空效应的

### 参考文献:

- [1] Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute. Hand Book of Steel Drainage & Highway Construction Products[M]. Second Canadian Edition. Cambridge: Corrugated Steel Pipe Institute, 2007.
- [2] National Corrugated Steel Pipe Association. Corrugated Steel Pipe Design Manual[M]. Dallas: National Corrugated Steel Pipe Association, 2008.
- [3] American Iron and Steel Institute. Modern Sewer Design [M]. Fourth Edition. Washington, D.C.: American Iron and Steel Institute, 1999.
- [4] 平山 SI 株式会社. 波形钢板资料[M]. 首尔: 平山 SI 有限公司, 2006.

- [5] 李祝龙, 梁养辉, 黄志福, 等. 低路堤荷载作用下钢波纹板拱桥应变的测试研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2013(5).
- [6] 冯忠居, 乌延玲, 贾彦武, 等. 钢波纹管涵洞受力与变形特性模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013(1).
- [7] 乌延玲. 公路钢波纹管涵洞受力与变形特性及应用研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2012.
- [8] 彭立, 张阳, 穆程, 等. 高填土大跨钢波纹管涵力学性能分析与测试[J]. 中外公路, 2016(6).
- [9] 杨成栋. 开截面波纹钢板小桥模型试验研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2011.
- [10] 徐伟博. 管拱形覆土波纹钢板管涵受力性能试验研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2015.

收稿日期: 2018-05-27

作者简介: 孙智慧, 男, 硕士, 讲师. E-mail: 376789987@qq.com

\* 通信作者: 邢逸航, 男, 硕士. E-mail: 1256347936@qq.com

过渡段,流变阶段时间效应突出;杨红军等基于收敛限制法对时空效应下隧道变形及二衬支护时机进行了分析;陈孝湘等阐述了关键块体时空效应的概念,认为基于时空效应基本原则可省去部分临时支护,同时可提高隧道施工的安全性和经济性;刘学增等基于大量现场监测数据对公路隧道围岩时间效应进行了统计分析,得到了各类围岩变形稳定时的收敛和拱顶下沉值;张青龙、李志清、何栋梁等通过现场监测对不同条件下隧道围岩变形时空效应进行了分析;李利平等通过对超大断面隧道软弱破碎围岩空间变形的物理模拟得出软弱破碎低强度和流变特性使围岩变形具有更强的时空效应。在数值模拟方面:吴波基于弹-黏塑性模型,分析了浅埋隧道施工性态的时空效应;赵旭峰等通过模拟开挖面空间约束效应和软弱围岩流变时效的耦合作用,得出在作业面影响范围内,开挖面空间效应明显,在此范围外,软弱岩体流变时效明显;杨有海等基于时空效应反分析了乌鞘岭隧道 F7 断层发生大变形的原因;桂荣等通过数值模拟得出了高应力软岩隧道的时空效应规律。上述成果丰富了时空效应理论及其工程运用,但针对背斜核部区围岩时空效应的研究并不多见。

该文拟以雅康高速公路周公山隧道为例,选取隧道过沙坪背斜核部区域 K8+559~K8+527 段围岩接触压力、净空收敛等监测成果,结合隧道支护情况对隧道围岩变形时空效应进行分析,以期获得背斜复杂岩区隧道变形规律。

## 1 工程概况

周公山隧道位于四川省雅(安)康(定)高速公路雅安段,全长 4 179 m,隧道主洞设计净宽 10.25 m、净高 5 m,隧道设计速度 80 km/h。

隧址区整体呈河谷低山构造剥蚀地貌,线路穿越突出山脊,山前河流呈“C”形环绕。坡表浅沟发育,沟谷纵横,坡表覆盖坡残积层,局部陡坡地段基岩裸露。区内地形最高点高程为 1 660 m,最低点的青衣江高程为 580 m,相对高差 1 080 m。

隧道围岩主要由粉砂岩、细砂岩夹薄层泥岩组成,强度较高。隧道穿越沙坪背斜,背斜呈 SN 向展布,轴部向 N 倾伏,整体宽缓。背斜 E 翼整体产状  $290^{\circ}\sim 300^{\circ}\angle 30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ,背斜 W 翼整体产状  $35^{\circ}\sim 75^{\circ}\angle 18^{\circ}\sim 28^{\circ}$ 。背斜核部(K8+520 $\pm$ 40 m)倾伏角  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ,埋深 280~300 m,岩性为中厚层粉砂岩、细砂岩夹泥岩,

层状构造,细砂岩厚 0.9 m、泥岩夹层厚 0.2 m,产状  $290^{\circ}\angle 18^{\circ}$ 。受构造影响产生扭曲变形,次级节理裂隙面发育,但裂隙面闭合,间距一般为 5~10 cm,岩体较为破碎,呈块状~碎块状,开挖后易掉块,塌落。无明显地下水出露,局部有少量渗滴水,现场为 IV 级围岩,如图 1 所示。

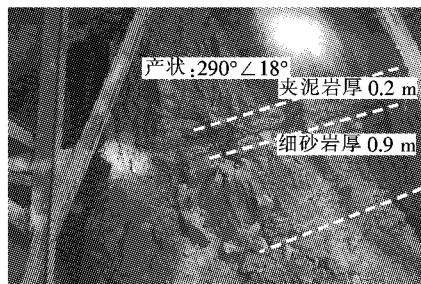
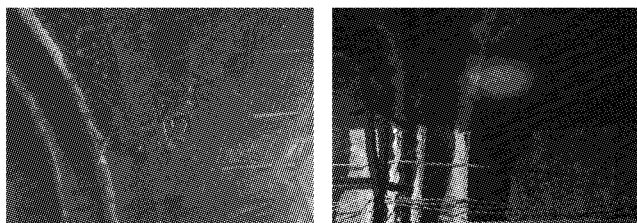


图 1 隧道过沙坪背斜核部区围岩特征(K8+527)

变形严重桩号为 K8+610~K8+542,长 68 m。K8+600 断面拱顶出现脱落掉块,掉块区延续长度约 6 m,厚度约 7 cm,宽度约 20 cm,见图 2(a)。K8+559 断面初支右侧混凝土出现局部剥落、掉块,工字钢变形现象。剥落区面积约 0.3 m<sup>2</sup>,厚度 1~3 cm,工字钢向外挤出变形,施作复拱后埋设土压力盒进行接触压力监测,见图 2(b)。



(a) K8+600 拱顶初支开裂

(b) K8+559 复拱

图 2 支护变形特征

背斜核部区域原设计 IV 级围岩支护为格栅钢架  $10\times 15@1$  m,钢筋网采用  $\phi 6.5@25$  cm, $\phi 22$  mm 砂浆锚杆长 3 m、纵 $\times$ 环间距为 1.0 m $\times$ 1.2 m,喷射混凝土厚 18 cm,预留变形量 6 cm,二次衬砌 C30 模筑混凝土厚 40 cm。

鉴于前期 K8+600~K8+580 段变形突出,为保证隧道顺利通过沙坪背斜核部区域,于背斜核部区桩号 K8+550 处适当调整了设计参数和施工工序。

支护参数调整:采用“先让后抗”的方法。将单层支护调整为双层支护(图 3)。第 1 层支护参数: I 18 @1.0 m 型钢拱架,钢筋网采用  $\phi 8@20$  cm, $\phi 22$  mm 砂浆锚杆长 3 m、纵 $\times$ 环间距为 0.8 m $\times$ 1.0 m。为允许围岩在第一层支护后变形,达到“先让”的目的,波浪

形喷混凝土,拱间喷混凝土厚 15 cm,拱架处喷混凝土厚 15 cm。当第一层支护拱架变形、初支开裂或接触压力初期稳定后再急剧上升时,施作第 2 层支护, I 18 @1.0 m 型钢拱架,两层喷混凝土总厚 45 cm。预留变形量由 6 cm 调整至 10 cm。

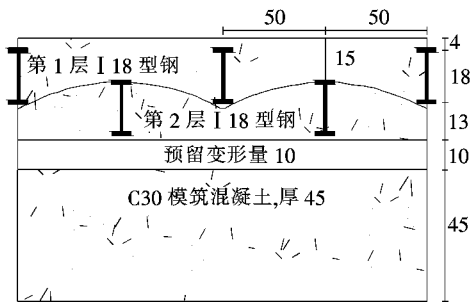


图 3 双层拱架纵断面示意图(单位:cm)

施工工序调整:严格贯彻“短开挖、弱爆破、强支护、早封闭、快成环”的原则。将上下台阶开挖调整为环形预留核心土法开挖。开挖进尺由 3.2 m 调整为 1.6 m,核心土面积为断面面积的 60%。

2 监测简介

选择 K8+559、K8+527 断面上布设接触压力和净空收敛监测点;K8+551、K8+543、K8+535 等每间隔 8 m 布设净空监测。同一断面接触压力和净空监测观测点位于相同部位,测点布置见图 4。

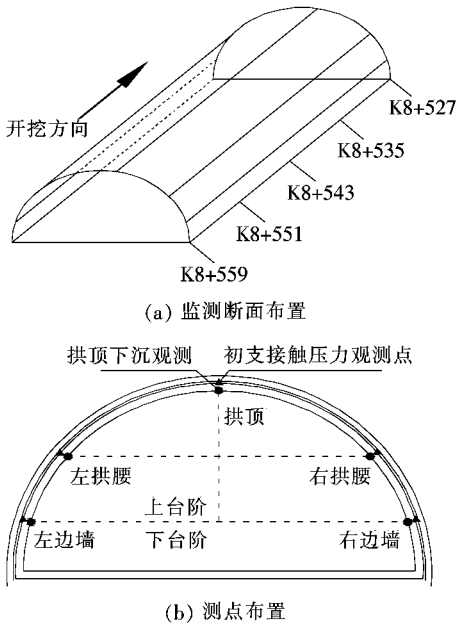


图 4 监测断面及测点布置

3 围岩变形时空效应分析

3.1 时间效应分析

(1) 初支压力—时间关系

对 K8+559 进行了为期 33 d 的初支与围岩接触压力观测,最大值出现在拱顶,量值为 760.7 kPa;对 K8+527 进行了为期 52 d 的观测,最大值出现在右边墙,量值为 680.1 kPa,见图 5、6。

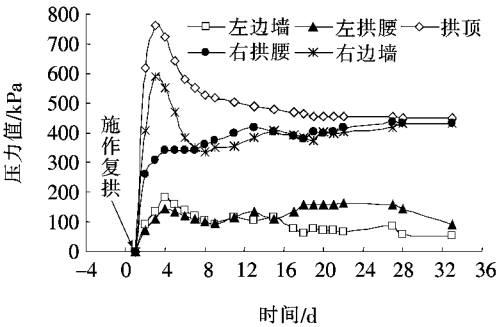


图 5 K8+559 接触压力监测结果

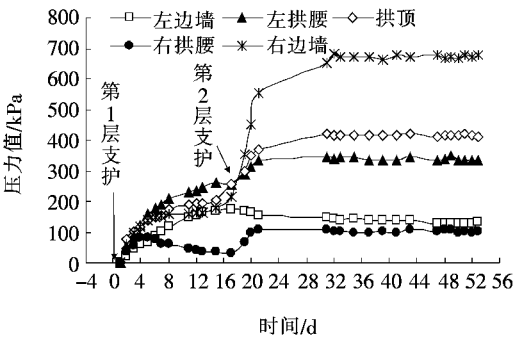


图 6 K8+527 接触压力监测结果

由图 5 可知:① K8+559 施作复拱后,复拱与原支护之间的接触压力在开始 4 d 内迅速增加。尤其是拱顶第 4 d 的压力值达 760.7 kPa。且其拱顶下沉也较明显,最大沉降速率为 4.8 mm/d,最终下沉 36.7 mm。其后,拱顶压力值有所降低,在第 14 d 进入基本稳定状态;② 其他部位接触压力也是前 4 d 内增值较快,量值上较拱顶低,但均于第 14 d 进入稳定状态。

由图 6 可知:K8+527 开挖后,立即施作第 1 层支护,允许围岩和前期临时支护协同变形。接触压力表现为在前 8 d 内以较均匀速率稳步增长,第 8 d 后,压力值增长缓慢。在 12 d 时,压力值逐渐进入稳定状态,并于第 17 d 时施作第 2 层支护,支护后,形成双层支护体系。在 17~21 d 内,除左边墙变化较小外,其他部位接触压力值迅速增长。尤其是右边墙,于第 32

d 时达到最大值 680.1 kPa。之后进入稳定状态。

## (2) 净空变化—时间关系

K8+559、K8+527 净空收敛监测结果分别见图 7、8。

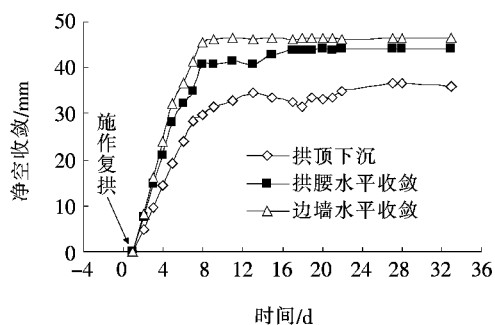


图 7 K8+559 净空收敛监测结果

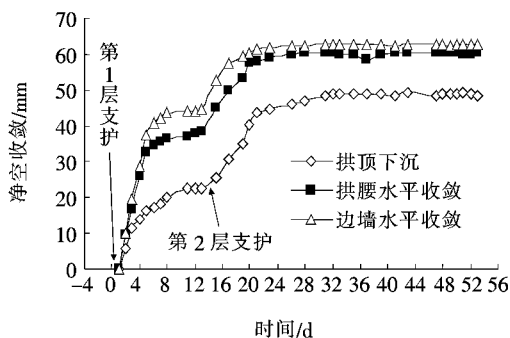


图 8 K8+527 净空收敛监测结果

由图 7 可知:K8+559 施作复拱后,其净空变化在前期以较大速率呈线性增长。在第 8 d 时,累积拱顶下沉、拱腰水平收敛、边墙水平收敛量值分别为 29.7、40.6、45.7 mm。在第 8~13 d,净空变化速率逐步减小,各位移增长缓慢,在第 13 d 时,累积拱顶下沉、拱腰水平收敛、边墙水平收敛量值分别为 34.7、40.9、46.2 mm。之后,拱腰以及边墙水平收敛趋于稳定,最终变形量值分别为 44.3、46.7 mm。在第 13~18 d,拱顶下沉量值有一定的减小趋势,这可能与当时监测环境相关。在第 18 d 之后,拱顶下沉逐渐趋于稳定状态,最终下沉量为 36.1 mm。

综上所述,K8+559 断面在前期 1~8 d 内处于急剧变形状态,8~14 d 处于缓慢变形状态,并于 14 d 左右趋于平稳。

由图 8 可知:K8+527 开挖后,立即施作第 1 层支护,允许围岩和前期临时支护协同变形。同样,净空变化在前 8 d 内以较大速率稳步增长,第 8 d 后,增长缓慢。在 12 d 时,净空位移逐渐进入前期稳定状态。随

着围岩内部应力的调整,围岩于第 16 d 进入新的变形阶段。在第 17 d 时施作了第 2 层支护,形成了双层支护体系。在 17~21 d 内,净空位移迅速增长。随着第 2 层支护逐渐产生效力,净空收敛在 27 d 时逐渐趋于平稳,并进入稳定状态,最终量值分别为 48.6、60.3、62.8 mm。

综上所述,K8+527 断面在前期 1~8 d 内处于急剧变形状态,8~13 d 处于缓慢变形状态,并趋于前期稳定;但在第 16 d 时,进入新的变形阶段,且在 17~21 d 内拱顶下沉迅速增长,在 27 d 时逐渐进入稳定状态。且由于支护效力,后期变化不如前期强烈。

## (3) 时间效应分析

K8+559 断面接触压力和变形在初始 4 d 内增值较快,第 8 d 后均趋于平稳,于 14 d 进入稳定状态。K8+527 断面第 1 层支护后,接触压力和变形在初始 4 d 内增值较快,4~8 d 间缓慢变形,在 8~14 d 间趋于稳定;因泥岩的流变,断面于 16 d 时进入新变形阶段,在 17~21 d 间急剧变形,21~27 d 间缓慢变形,于 31 d 趋于稳定,存在两个变形周期。

综上所述,该文隧道变形周期为 14 d,初始 4 d 变形明显,可能由岩石开挖卸荷瞬时回弹造成;4~8 d 缓慢变形,可能由岩体内部应力调整造成;8~14 d 趋于稳定状态。而针对 K8+527 断面的第 2 次变形,分析认为由于内部泥岩流变引起。

## 3.2 空间效应分析

### (1) 接触压力随空间分布规律

断面 K8+559 轴线右边接触压力较左边大,拱顶最大,为 760.7 kPa[图 9(a)];断面 K8+527 在右边墙处接触压力最大,为 680.1 kPa[图 9(b)]。

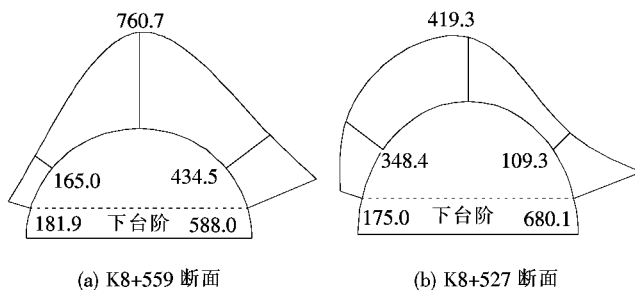


图 9 围岩—初期支护接触压力空间分布图(单位:kPa)

### (2) 净空变化随空间分布规律

监测断面净空变化总体情况为:累积拱顶下沉量为 36~51 mm,拱腰水平收敛 44~61 mm,边墙水平收敛 46~66 mm,见图 10。

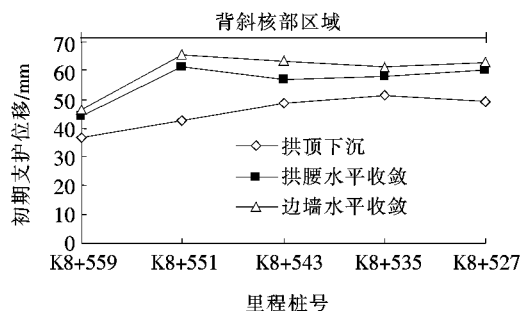


图10 背斜核部区域初支后净空变化

在空间分布上:净空变化量值沿隧洞开挖方向逐渐增大,表现为越靠近背斜核部变形越大。同一断面边墙水平收敛量值最大,拱顶下沉量值最小。虽然拱腰、边墙水平收敛位移较拱顶下沉大,但拱腰、边墙水平收敛为双向变形,而拱顶下沉为单向变形。相对而言,拱顶变形更严重。

#### 4 支护效果分析及建议

支护效果分析:对比分析 K8+559 和 K8+527 断面接触压力,认为通过双层支护,先让“第1层支护+围岩”协同变形,然后第2层支护有效控制围岩进一步变形,而不是即时就采用强支护,使开挖后围岩压力得到逐步释放,最终作用在支护结构上的压力有所降低,说明调整后的双层支护、增加预留变形量方案合理。

支护建议:针对隧道经过背斜核部软硬岩区,应充分考虑软岩的时效变形。在围岩变形严重区段,应加强隧道监控量测,并结合监测结果合理选择支护时机和支护措施,可考虑“先让后抗”、适当增大预留变形量的方式支护或采用双层支护。

#### 5 结论

结合雅康高速公路周公山隧道经过沙坪背斜核部软硬岩区域的围岩接触压力、净空变形资料、设计施工情况,对围岩变形时空效应进行了分析,得到以下结论:

(1) 接触压力监测中:断面 K8+559 拱顶接触压力最大,为 760.7 kPa;断面 K8+527 在右边墙处接触压力最大,为 680.1 kPa。净空监测中:累积拱顶下沉 36~51 mm,拱腰水平收敛 44~61 mm,边墙水平收敛 46~66 mm。

(2) 时间效应方面:隧道变形周期为 14 d,初始 4 d 变形明显,为岩石卸荷瞬间回弹变形;4~8 d 缓慢变

形,为岩体内部应力调整塑性变形;8~14 d 趋于稳定状态。因泥岩流变特性围岩有二次变形的可能,二次变形规律和第一次相同,周期亦为 14 d。

(3) 空间效应方面:净空变化量值沿隧洞开挖方向逐渐增大,表现为越靠近背斜核部变形越大。同一断面边墙水平收敛量最大,拱顶下沉量最小。

(4) 针对软硬岩相间区围岩,应充分考虑软岩的时效变形。该隧道中监测结果证明了调整后“先让后抗”、适当增大预留变形量双层支护的方案合理,为周公山隧道顺利穿越沙坪背斜提供了依据。

#### 参考文献:

- [1] 蒋树屏.我国公路隧道建设技术的现状及展望[J].交通世界,2003(C1).
- [2] 王梦恕.中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J].隧道建设,2014(3).
- [3] 洪开荣.我国隧道及地下工程发展现状与展望[J].隧道建设,2015(2).
- [4] 许宏发,耿秋生,李朝甫,等.破碎岩体注浆加固体强度估计[J].岩土工程学报,2013(11).
- [5] 孙元春,尚彦军.隧道岩石围岩变形时空效应分析[J].工程地质学报,2008(2).
- [6] 杨红军,夏才初,彭裕闻,等.时空效应下隧道的收敛变形预测及二衬合理支护时机[J].公路,2010(4).
- [7] 陈孝湘,夏才初,缪圆冰.基于关键块体理论的隧道分部施工时空效应[J].长安大学学报:自然科学版,2011(2).
- [8] 刘学增,苏京伟,王晓彤.NATM 公路隧道围岩时间效应统计分析 with 变形稳定性评价指标[J].土木工程学报,2009(11).
- [9] 张青龙,李宁,曲星,等.富水软岩隧洞变形特征及变形机制分析[J].岩石力学与工程学报,2011(11).
- [10] 李志清,丁春林,李双美,等.浅埋大断面黄土隧道围岩变形时空效应分析[J].华东交通大学学报,2014(4).
- [11] 何栋梁,成彦惠,方建勤,等.考虑时空效应的隧道围岩变形分析[J].公路交通科技,2016(7).
- [12] 李利平,李术才,赵勇,等.超大断面隧道软弱破碎围岩空间变形机制与荷载释放演化规律[J].岩石力学与工程学报,2012(10).
- [13] 吴波,刘维宁,高波,等.城市浅埋隧道施工形态的时空效应分析[J].岩土工程学报,2004(3).
- [14] 赵旭峰,王春苗,孔祥利.深部软岩隧道施工性态时空效应分析[J].岩石力学与工程学报,2007(2).
- [15] 杨有海,王长虹.考虑时空效应的隧道工程黏弹性位移反分析[J].地下空间与工程学报,2009(3).
- [16] 桂荣,刘永.高应力软岩隧道施工的时空效应分析[J].南华大学学报:自然科学版,2011(1).