

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2018.02.005

特大断面板岩隧道施工期围岩变形时空效应分析^{*}

左清军^{1,2}, 吴友银^{1,2}, 闫天玺^{1,2}

(1. 三峡大学 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 特殊土土力学研究所, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 目前, 关于特大断面板岩隧道施工期围岩时空变形规律缺乏系统性的总结。以沪昆客运专线长昆湖南段姚家隧道为例, 结合变形监测资料, 分析在不同开挖方法下特大断面板岩隧道施工期围岩时空变形规律, 划分围岩变形-时间特征曲线及围岩变形-距掌子面距离关系曲线的类型; 分析围岩位移释放率与时间和距掌子面距离的关系, 研究围岩级别和空间位置对特大断面板岩隧道施工期围岩变形时空效应的影响规律。结果表明: 围岩变形-时间特征曲线的类型可分为“弯弓”型和“台阶”型。“弯弓”型划分三个变形阶段, 适用于Ⅲ、Ⅳ级围岩; “台阶”型划分四个变形阶段, 适用于Ⅴ级围岩。围岩变形与距掌子面距离的关系曲线的类型可分为“单厂”型和“双厂”型。“单厂”型曲线出现在Ⅲ、Ⅳ级围岩地段, 当监测断面距掌子面超过 5 倍洞径时, 围岩变形趋于稳定, 空间效应趋于消失; “双厂”型曲线出现在Ⅴ级围岩地段, 当监测断面距掌子面超过 3 倍洞径时, 围岩变形基本趋于稳定。最后, 提出了不同围岩级别下隧道围岩径向位移释放率随时间和距掌子面距离的变化规律, 研究结论对于特大断面板岩隧道围岩长期稳定性的研究具有借鉴价值。

关键词: 特大断面隧道; 施工期; 时空效应; 位移释放率

中图分类号: U451⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2018)02-0233-11

Analysis of Time-space Effect for Surrounding Rock Deformation in Super-large Cross Section Slate Tunnel During Construction Period

ZUO Qingjun^{1,2}, WU Youyin^{1,2}, YAN Tianxi^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Institute of Problematic Soil Mechanics, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Currently the time-space deformation regular pattern of the surrounding rock of super-large cross sectional slate tunnel during construction period is short of systematic summary. Taking Yaojia tunnel in Chang-Kun Hunan Section of Shanghai-Kunming Passenger Dedicated Line as an example, the time-space deformation regular pattern of tunnel under conditions of different excavation approaches was analyzed based on the field deformation monitoring data. The types of the relationship curves of the surrounding rock deformation with time and the distance to the tunnel working face were divided. The relationship of the surrounding rock displacement releasing rate with time and the distance to the tunnel working face was analyzed. The influence of surrounding rock grade and space location on time-space effect of surrounding rock deformation was

^{*} 收稿日期: 2017-03-09; 修回日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402259)、防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金项目(2016KJZ18)、三峡大学学位论文培育基金项目(2018SSPY039)资助

作者简介: 左清军(1983-), 男, 副教授, 博士。主要从事地质工程方面的教学与科研工作。Email: qjzuo@ctgu.edu.cn

通讯作者: 吴友银(1993-), 男, 硕士研究生。主要从事地质工程方面的研究工作。Email: youyinw@sina.com

researched. The results show that the surrounding rock deformation-time curve can be divided into “Bow” type and “Bench” type. The “Bow” type can be concluded into 3 deformation stages and it is suitable for surrounding rocks of grade III and grade IV. The “Bench” type can be divided into 4 deformation stages and it is suitable for surrounding rock of grade V. The relationship curve between surrounding rock deformation and the distance from the working face can be divided into “Single Chang” type and “Double Chang” type. “Single Chang” type curve is fit for surrounding rocks grade III and grade IV. The surrounding rock deformation tends to be stable and the time-space effect disappears when the distance from the monitoring site to the working face is larger than 5 times of the tunnel diameter. “Double Chang” type curve is suitable for surrounding rock of grade V. The surrounding rock deformation tends to be stable when the distance from the monitoring site to the working face is larger than 3 times of the tunnel diameter. Finally the surrounding rock displacement releasing rate under different rock grades with the change of time and the distance to the working face is put forward. The results can be taken as a reference for the research on long-term stability of surrounding rock of super large cross sectional soft rock tunnel.

Keywords: super-large cross section tunnel; construction period; time-space effect; displacement releasing rate

引 言

在岩石地层中开挖隧道,隧道围岩的应力和变形并不是在瞬间释放完成,即使及时施作支护,围岩和支护之间的压力及其变形随着时间的延长而逐渐增大并趋于稳定。在隧道开挖过程中,围岩因开挖卸荷不断地进行应力释放,致使围岩的变形发展、支护体系的强度变化在时间和空间上均需要经历一个过程,这就是隧道施工的时空效应^[1]。对于断面面积大于 100 m² 的隧道称为特大断面隧道。与其它断面形式的隧道相比,特大断面隧道在围岩力学行为、断面形式、施工方法和支护参数等方面表现不同,因而隧道施工期围岩变形的时空效应呈现不同的特征,特别是在板岩地层开挖隧道,时空效应表现尤为明显,若忽略时空效应的影响,会对施工安全带来隐患。因此,研究特大断面板岩隧道施工期围岩变形的时空效应对于保证隧道长期稳定性具有重要的工程意义。

关于隧道施工期围岩变形的时空效应,已有学者对其进行研究。归纳起来,主要侧重于从数值模拟、监控量测等方面进行分析,且大多数的研究是单方面的,即单考虑时间效应或空间效应。例如, M. S. Nazary 等^[2]、Ge’ raldine Fabre 等^[3]、F. I. Shalabi^[4] 分析了时间效应对隧道围岩稳定性的影响,扈世民^[5]、周硕安^[6] 研究了隧道围岩位移的空间效应。虽然在理论上可将时空效应分为时间效应和空间效

应,但在隧道开挖过程中,时间效应和空间效应是同时发生的,不能简单地将其一分为二,应有机地将时空效应统一起来考虑。尽管文献[7-16]已将时间效应和空间效应统一到隧道施工期围岩稳定性分析之中,但针对特大断面隧道这一类断面形式,施工期围岩时空变形规律尚缺乏系统性的总结。针对隧道围岩位移释放系数,张常光等^[17]、郭瑞等^[18] 对其进行了研究,但关于隧道围岩位移释放系数与时空之间的关系的研究,少有涉及。

本文以沪昆客运专线长昆湖南段姚家隧道施工期所表现出的时空效应问题为出发点,结合变形监测资料,总结在不同开挖工法下围岩的时空变形规律,并从围岩位移释放率的角度分析围岩级别和空间位置对围岩变形时空效应的影响,为特大断面隧道围岩长期稳定性的研究提供参考。

1 工程概况

沪昆铁路客运专线长昆湖南段姚家隧道位于湖南省芷江县土桥乡,隧道进口位于黄家垄村,途经毛家冲、张家冲、白栗树、毛家垄和黄栗坳等村,出口位于范家冲村,起讫里程为:DK380+115~DK387+070,全长 6995 m,隧道最大埋深约 247 m,设计净跨度为 14.62 m,净高度为 8.80 m,开挖断面积约 140 m²,净空面积约 120 m²,属特大断面隧道。隧道全线板岩地层的长度为 6090 m,占总长度的 87%,板岩遇水会发生软化、膨胀、崩解,在富水区域

开挖板岩地层时,围岩变形的时空效应表现较突出。

地层产状为 $255^{\circ}\sim 260^{\circ}\angle 46^{\circ}\sim 50^{\circ}$,板岩板理的走向与隧道轴线近于平行,板理面间距为 $1\sim 2$ m,为厚层层状结构。板岩板理的产状与隧道轴线之间的夹角对围岩稳定性的影响较大,夹角越小,稳定性越差。由于板岩板理的走向与隧道轴线近乎平行,开挖时围岩的稳定性较差,但岩层为厚层状结构,具有一定的自稳性,因此围岩从变形向失稳破坏发展需要一定时间,若支护能及时跟进,可防止坍塌。对于姚家隧道全线路而言,板岩板理的走向与洞轴线的夹角几乎呈 0° 相交,上下浮动不大,加之厚层状结构有利于围岩的稳定,因此本文对于围岩变形时空效应的研究未考虑板岩板理方向(各向异性)的影响。

研究区地貌单元属受长期剥蚀切割作用的低山地区,沿线地形起伏较大,地形陡峻,坡度一般为 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$,陡坡可达 70° 以上,相对高差约 304 m。地表植被较茂密,地表多为林地、荒坡和冲沟,局部地段为种植用地。姚家隧道含 2 个斜井,施工时隧道共有 5 个工作面。进出口地段均为山坡,进口处地面自然坡度 45° ,出口处地面自然坡度 50° 。姚家隧道出口全貌如图 1 所示。



图 1 姚家隧道出口全貌

Fig. 1 Complete view of Yaojia tunnel exit

2 围岩变形时间效应分析

按照弹塑性理论,假设隧道围岩的变形是弹性的,在隧道开挖的瞬间,应力完全释放。根据此理论,如果围岩释放的应力小于支护结构的极限强度,隧道开挖后,应力释放将不会产生坍塌破坏,变形不会进一步发展,围岩将会保持永久稳定。显然这与实际情况不符。长期的监测结果表明,隧道开挖后围岩变形是与时间因素密切相关的。

本文结合姚家隧道拱顶下沉监控量测数据,对在不同隧道开挖方法(三台阶七步开挖法、弧形导坑

预留核心土法、台阶法)下围岩的变形随时间的变化规律进行分析,得出特大断面板岩隧道围岩变形时间效应。

2.1 三台阶七步开挖法下围岩变形时间效应

铁路大断面隧道三台阶七步开挖法是以弧形导坑开挖留核心土为基本模式,分上、中、下三个台阶七个开挖面,各部位的开挖与支护沿隧道纵向错开、平行推进的隧道施工方法。三台阶七步开挖法可分为以下三个步骤:上部弧形导坑环向开挖,施作拱部初期支护;中、下台阶左右错开开挖,施作墙部初期支护;中心预留核心土开挖、隧底开挖,施作隧底初期支护。每步开挖后均应及时支护,隧底初期支护后应及时施作仰拱,尽早封闭成环。三台阶七步开挖法的透视图及现场施工情况如图 2 和图 3 所示。

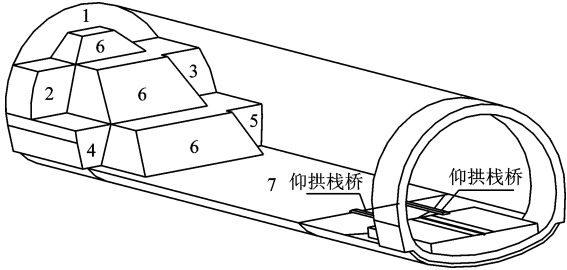


图 2 三台阶七步开挖法透视

Fig. 2 Perspective diagram of three-bench seven-step excavation method



图 3 三台阶七步开挖法现场情况

Fig. 3 Site conditions of three-bench seven-step excavation method

选取断面 DK380+990 进行围岩变形分析,DK380+990 位于姚家隧道进口段,围岩为凝灰质板岩,围岩级别为 V 级,岩体破碎,稳定性差,施工采用三台阶七步开挖法开挖。

断面 DK380+990 围岩拱顶下沉和拱顶下沉速率随时间的变化曲线分别如图 4 和图 5 所示。

由图 4 和图 5 可知,拱顶沉降变形分为 4 个阶段:①急速增长阶段,出现在开挖后 $1\sim 7$ d,开挖后

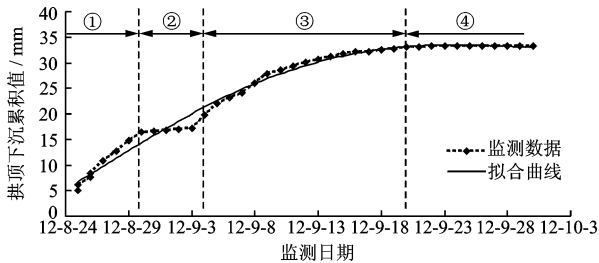


图 4 DK380+990 拱顶沉降—时间曲线

Fig. 4 Curve of vault settlement with time at DK380+990

注:①表示急速增长阶段;②表示缓慢增长阶段;③表示快速增长阶段;④表示基本稳定阶段。图 5 同

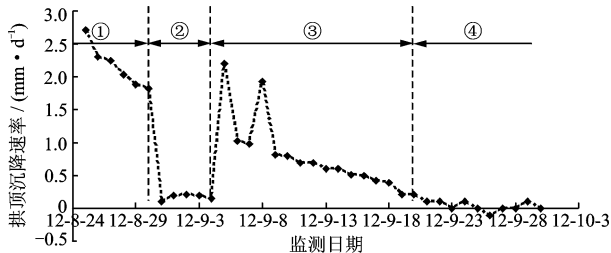


图 5 DK380+990 拱顶沉降速率—时间曲线

Fig. 5 Curve of vault settlement rate with time at DK380+990

立刻进行初喷并埋设量测点进行第一次量测,开挖后约 10 h 进行第二次量测,拱顶下沉累积值约 6.2 mm,下沉速率为 2.71 mm/d,当日变形速率为 1.82~2.71 mm/d,该阶段的沉降量占总沉降量的 44.14%;②缓慢增长阶段,出现在开挖后的 8~12 d,当日变形速率为 0.10~0.20 mm/d,该阶段的沉降量占总沉降量的 7.51%;③快速增长阶段,出现在开挖后 13~26 d,当日变形速率为 0.40~2.20 mm/d,该阶段的沉降量占总沉降量的 45.05%;④基本稳定阶段,开挖 27 d 后,当日变形速率约 0.10~0.20 mm/d,该阶段的沉降量占总沉降量的 3.30%。变形稳定后,拱顶沉降累计值为 33.3 mm。

通过拟合及回归曲线方程剩余标准差的比较,选择指数函数 $y=a(1-e^{-bt})$ 为 DK380+990 断面拱顶沉降—时间曲线的最佳拟合函数,通过计算可得出拟合系数 $a=37.615$ 、 $b=0.068$ 。因此 DK380+990 断面拱顶沉降—时间曲线的回归方程为:

$$y=37.615(1-e^{-0.068t}) \quad (1)$$

拱顶沉降变形之所以呈现四个阶段,主要受两个因素的影响:一是板岩的蠕变特性,二是隧道的开挖方法,当采用三台阶七步开挖法时,中台阶和下台阶开挖后,拱顶测点的沉降量出现不同程度的突变,

使得拱顶沉降的阶段更明显,表明中台阶和下台阶开挖会促使围岩变形骤然增大,主要变形集中于急速增长阶段和快速增长阶段,如图 6 所示。

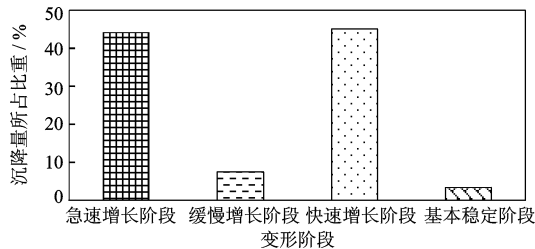
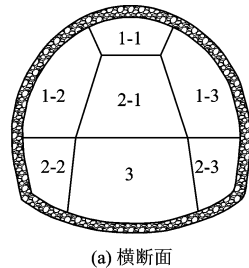


图 6 DK380+990 各变形阶段的沉降量占总沉降量的比值

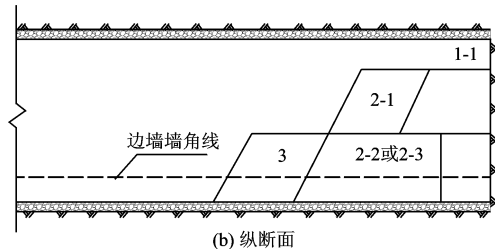
Fig. 6 Ratio of the stated settlement to the total settlement at DK380+990

2.2 弧形导坑预留核心土法下围岩变形时间效应

弧形导坑预留核心土法是将隧道断面分成左右两个侧壁坑和中洞核心三大部分开挖,短台阶分两层开挖,中洞核心部分分三层开挖。弧形导坑预留核心土法施工工序如图 7 所示。



(a) 横断面



(b) 纵断面

图 7 弧形导坑预留核心土法施工工序

Fig. 7 Construction process of arc heading and reserving core soil method

选取断面 DK380+755 进行围岩变形分析, DK380+755 位于姚家隧道进口段,围岩为凝灰质板岩,围岩级别为 IV 级,施工采用弧形导坑预留核心土法开挖。

断面 DK380+755 围岩拱顶下沉和拱顶下沉速率随时间的变化曲线分别如图 8 和图 9 所示。

由图 8 和图 9 可知,拱顶沉降变形分为三个阶段:①初始增长阶段,出现在开挖后 1~10 d,开挖后立刻进行初喷并埋设量测点进行第一次量测,开挖

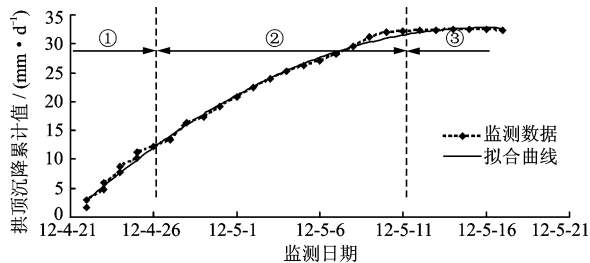


图 8 DK380+755 拱顶下沉—时间曲线

Fig. 8 Curve of vault settlement with time with DK380+755

注:①表示初始增长阶段;②表示快速增长阶段;③表示基本稳定阶段。图 9 同

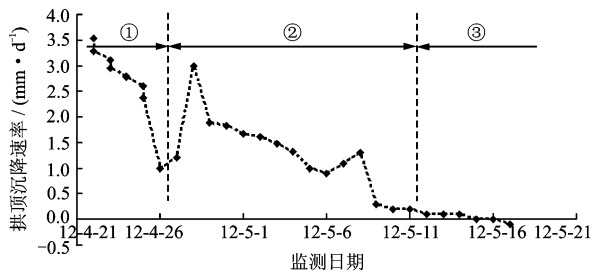


图 9 DK380+755 拱顶下沉速率—时间曲线

Fig. 9 Curve of vault settlement rate with time at DK380+755

后约 10 h 进行第二次量测,拱顶下沉累积值约 2.9 mm,下沉速率为 3.29 mm/d,当日变形速率为 1.00~3.53 mm/d,该阶段的沉降量占总沉降量的 41.36%;②快速增长阶段,出现在开挖后 11~21 d,当日变形速率为 0.89~3.00 mm/d,该阶段的沉降量占总沉降量的 49.69%;③基本稳定阶段,开挖 22 d 后,当日变形速率约 -0.09~0.29 mm/d,该阶段的沉降量占总沉降量的 8.95%。变形稳定后,拱顶沉降累积值为 32.4 mm。

通过对诸多回归曲线方程的比较,选择对数函数 $y = a \ln(1 + t)$ 为 DK380+755 断面拱顶沉降—时间曲线的最佳拟合函数,通过计算可得出拟合系数 $a = 8.428$ 。因此 DK380+755 断面拱顶沉降—时间曲线的回归方程为:

$$y = 8.428 \ln(1 + t) \quad (2)$$

由以上分析可知,弧形导坑预留核心土法和三台阶七步开挖法相比,由于施工工序的不同,使得围岩拱顶沉降变形呈现不同的阶段,拱顶沉降随时间的变化曲线也不同。上部弧形导坑和下部弧形导坑开挖后,拱顶测点的沉降量出现不同程度的突变,使得拱顶沉降的阶段更明显,表明上部弧形导坑和下部弧形导坑开挖对隧道顶部产生一定的影响。采用弧形导坑预留核心土法时,绝大部分围岩拱顶沉

降变形在初始增长阶段和快速增长阶段发展,少部分沉降变形在基本稳定阶段发展,如图 10 所示。

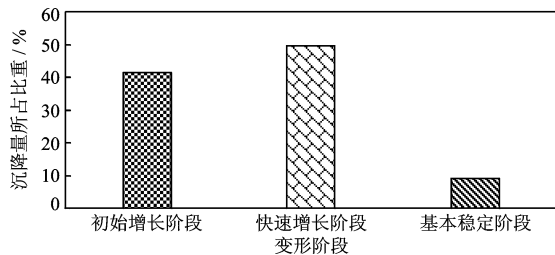


图 10 DK380+755 各变形阶段的沉降量占总沉降量的比值

Fig. 10 Ratio of the stated settlement to the total settlement at DK380+755

2.3 台阶法下围岩变形时间效应

台阶法开挖时将工作面分成上下两部分,若上部工作面超前时形成正台阶,称正台阶工作面;若下部工作面超前时形成倒台阶,称反台阶工作面。姚家隧道采用台阶法施工时,均采用正台阶法。采用正台阶法施工时,将洞室断面分成两部分,先掘上部断面使上部超前而出现台阶;爆破后先将拱部用喷射混凝土进行支护,出渣后在上下断面同时进行凿岩,如图 11 所示。

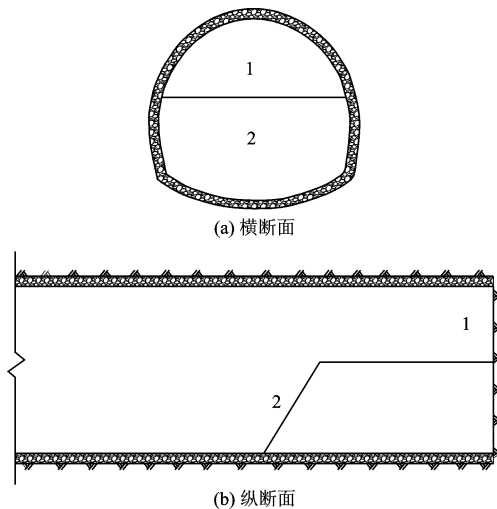


图 11 台阶法施工工序

Fig. 11 Construction process of bench method

选取断面 DK380+655 进行围岩变形分析,DK380+655 位于姚家隧道进口段,围岩为凝灰质板岩,围岩级别为Ⅲ级,岩体完整性较好,施工采用正台阶法开挖。

断面 DK380+655 围岩拱顶下沉和拱顶下沉速率随时间的变化曲线分别如图 12 和图 13 所示。

由图 12 和图 13 可知,断面 DK380+655 围岩拱顶下沉呈现 4 个阶段:①急速增长阶段,出现在开

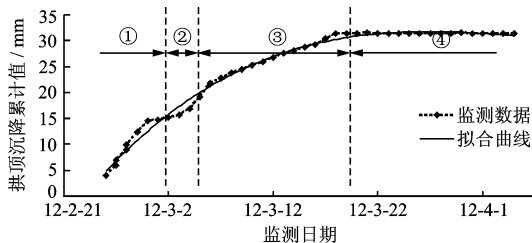


图 12 DK380+655 围岩拱顶下沉—时间曲线

Fig. 12 Curve of vault settlement with time at DK380+655

注:①表示急速增长阶段;②表示缓慢增长阶段;③表示快速增长阶段;④表示基本稳定阶段。图 13 同

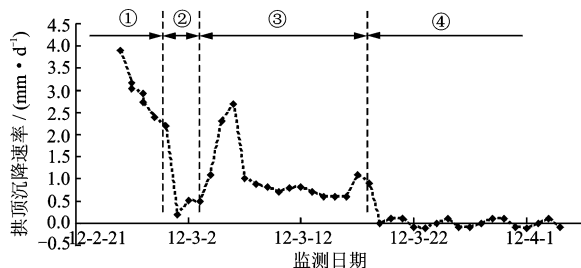


图 13 DK380+655 围岩拱顶下沉速率—时间曲线

Fig. 13 Curve of vault settlement rate with time at DK380+655

挖后 1~7 d,开挖后立刻进行初喷并埋设量测点进行第一次量测,开挖后约 10 h 进行第二次量测,拱顶下沉累积值约 5.9 mm,下沉速率为 3.16 mm/d,当日变形速率为 2.20~3.90 mm/d,该阶段的沉降量占总沉降量的 46.33%;②缓慢增长阶段,出现在开挖后的 8~11 d,当日变形速率为 0.18~1.10 mm/d,该阶段的沉降量占总沉降量的 6.35%;③快速增长阶段,出现在开挖后 12~25 d,当日变形速率为 0.59~2.70 mm/d,该阶段的沉降量占总沉降量的 46.33%;④基本稳定阶段,开挖 26 d 后,当日变形速率约 -0.10~0.10 mm/d,该阶段的沉降量占总沉降量的 0.10%。变形稳定后,拱顶沉降累积值为 31.4 mm。

断面 DK380+655 围岩拱顶下沉变形呈现四个发展阶段,是因为台阶法的开挖对围岩拱顶沉降变形具有一定的影响。采用台阶法时,每个台阶开挖的断面面积较大,且未预留核心土,致使围岩变形较大,变形发展历程较长,需经过急速增长阶段、缓慢增长阶段、快速增长阶段进入基本稳定阶段,围岩变形主要集中于急速增长阶段和快速增长阶段,如图 14 所示。

通过拟合优化,选择指数函数 $y = a(1 - e^{-bt})$ 为断面 DK380+655 围岩拱顶下沉变形—时间曲线的最佳拟合函数,通过计算得出 $a =$

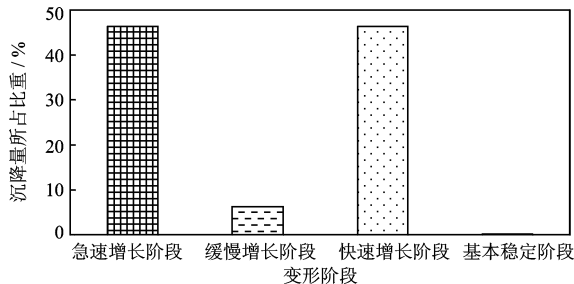


图 14 DK380+655 各变形阶段的沉降量占总沉降量的比值

Fig. 14 Ratio of the stated settlement to the total settlement at DK380+655

34.224, $b = 0.076$ 。因此,断面 DK380+655 围岩拱顶下沉—时间曲线的回归方程为:

$$y = 34.224(1 - e^{-0.076t}) \quad (3)$$

2.4 特大断面隧道围岩变形时间效应总结分析

通过总结不同开挖方法(围岩级别也不同)下特大断面隧道围岩变形随时间的变化规律,得出以下结论:

(1)围岩变形—时间特征曲线划分为两类。

第一类为“弯弓”型。这种曲线类型可以划分为 3 个阶段:①急速增长阶段,该阶段持续时间为 9~10 d 左右,平均变化速率为 0.85~3.53 mm/d;②缓慢增长阶段,持续时间为 10~13 d;③基本稳定阶段,变化速率一般小于 0.20 mm/d。此类曲线的特征为在开挖初期,隧道围岩变形速率较快,随着时间的推移围岩变形速率逐渐变小并趋于稳定。其适用于类似弧形导坑预留核心土法的对围岩扰动较小的开挖方法,采用对数函数表述围岩变形和时间的关系。

第二类为“台阶”型(或“双厂”型)。这种曲线类型可以划分为四个阶段:①急剧增长阶段,持续时间一般为 7 d,变化速率为 0.45~3.90 mm/d,该阶段的位移量占总位移量的 47%左右;②缓慢增长阶段,该阶段的持续时间为 3~4 d,平均变化速率为 0.18~1.10 mm/d,位移量占总位移量的 10%左右;③快速增长阶段,持续时间为 12 d 左右,该阶段的位移量占总位移量的 32%~47%;④基本稳定阶段,该阶段的平均变化速率一般小于 0.20 mm/d。此类曲线的特征为隧道开挖初期,围岩变形速率较快,最大能达到 5.00 mm/d,随后围岩变形速率逐渐减慢;然后受下一步开挖的影响,围岩变形再次加快,然后随着时间的推移围岩变形逐渐变慢,最后趋于稳定。其适用于类似台阶法的对围岩扰动较大的开挖

方法,采用负指数函数描述围岩变形和时间的关系。

(2)针对不同的围岩级别,即使相同的围岩级别,不同的部位,其围岩变形随时间变化的拟合函数是不同的,而具体选择哪一类函数需根据实际情况而定。本文将各种拟合函数进行对比分析,最后选择一种最佳拟合函数(指数函数和对数函数居多)对变形—时间曲线进行拟合。

(3)针对不同的开挖方法,特大断面隧道围岩变形的时间效应表现出不同的特征,围岩变形—时间曲线之所以呈现“弯弓”型和“台阶”型,原因是台阶法和三台阶七步开挖法上部台阶开挖范围较大,且围岩变形均会因每一个台阶的开挖引起陡然增大,围岩变形—时间曲线呈现小阶跃型,可划分为上述的急剧增长阶段、缓慢增长阶段、快速增长阶段和基本稳定阶段等四个变形阶段;而弧形导坑预留核心土法上部弧形导坑开挖范围较小,加上预留核心土的支挡作用有利于保持围岩的稳定,因此围岩变形—时间曲线光滑平缓,仅呈现急速增长阶段、缓慢增长阶段和基本稳定阶段等三个变形阶段。

(4)为了进一步研究隧道围岩施工期时间效应,计算不同时间的隧道围岩径向位移释放率(表 1),隧道径向位移释放率—时间曲线如图 15 所示。

表 1 不同时间的隧道围岩径向位移释放率

Table 1 Radial displacement releasing rate of surrounding rock with the change of time

量测断面	围岩级别	量测位置	位移/ mm	释放率/%			
				5 d	15 d	25 d	50 d
DK380+990	V	拱顶	33.30	32.43	69.37	96.70	100.00
		上测线	14.36	41.71	88.42	94.59	100.00
		下测线	10.54	76.62	97.15	99.72	100.00
DK380+755	Ⅳ	拱顶	32.40	23.77	69.14	99.69	100.00
		上测线	14.28	29.34	85.98	99.78	100.00
		下测线	10.23	50.97	100.00	100.00	100.00
DK380+655	Ⅲ	拱顶	31.44	31.63	75.72	100.00	100.00
		上测线	15.40	35.11	81.97	92.60	100.00
		下测线	10.30	51.17	100.00	100.00	100.00

注:针对围岩变形的时间效应,围岩径向位移释放率是指隧道某位置距离开挖后不同时间的指向洞内的围岩变形与距开挖初始时间足够长(时间效应影响范围之外,围岩已稳定)的同一位置、同一方向上的围岩变形之比

由图 15 可以看出,针对不同的围岩级别,即使相同的围岩级别不同的部位,隧道围岩径向位移释放率与时间的关系存在差异,这说明围岩级别和空间位置对隧道施工期围岩变形的时间效应产生一定的影响。不同围岩级别下隧道围岩径向位移释放率随时间的变化规律如下:

Ⅲ级围岩:拱顶部位在隧道开挖后 5 d 位移释放

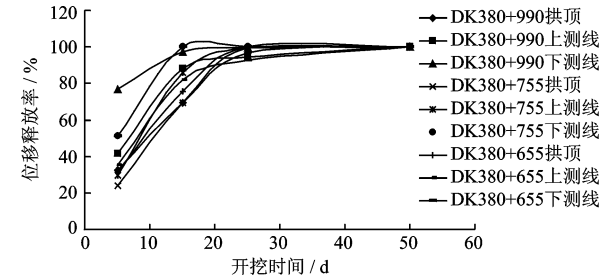


图 15 隧道围岩径向位移释放率与时间的关系

Fig. 15 Relationship between radial displacement releasing rate of surrounding rock and time

率达到 30%以上,开挖后 25 d 左右,位移释放率接近 100%;上测线部位在隧道开挖后 5 d 位移释放率达到 30%以上,开挖后 50 d 左右,位移释放率接近 100%;下测线部位在隧道开挖后 5 d 位移释放率达到 50%以上,开挖后 15 d 左右,位移释放率接近 100%。

Ⅳ级围岩:拱顶部位在隧道开挖后 5 d 位移释放率达到 20%以上,开挖后 30 d 左右,位移释放率接近 100%;上测线部位在隧道开挖后 5 d 位移释放率达到 30%以上,开挖后 50 d 左右,位移释放率接近 100%;下测线部位在隧道开挖后 5 d 位移释放率达到 50%以上,开挖后 15 d 左右,位移释放率接近 100%。

V级围岩:拱顶部位在隧道开挖后 5 d 位移释放率达到 30%以上,开挖后 50 d 左右,位移释放率接近 100%;上测线部位在隧道开挖后 5 d 位移释放率达到 40%以上,开挖后 50 d 左右,位移释放率接近 100%;下测线部位在隧道开挖后 5 d 位移释放率

达到 70% 以上,开挖后 30 d 左右,位移释放率接近 100%。

3 围岩变形空间效应分析

为了控制隧道围岩变形的发展,必须考虑隧道掘进工作面的空间约束作用。随着隧道工作面向前推进,其附近一定范围内围岩变形的发展和应力重分布都将受到掌子面的限制,使围岩的变形得不到自由、充分地释放,应力重分布不能很快完成。

为了阐明隧道掌子面对围岩变形的约束作用,选取分析时间效应的三个断面,即 DK380+990、DK380+755 和 DK380+655,对其围岩变形和距掌子面距离的关系进行深入分析。

3.1 DK380+990 围岩变形和距掌子面距离的关系

断面 DK380+990 围岩变形和变形速率与距掌子面距离 D 的关系曲线如图 16、17 所示。

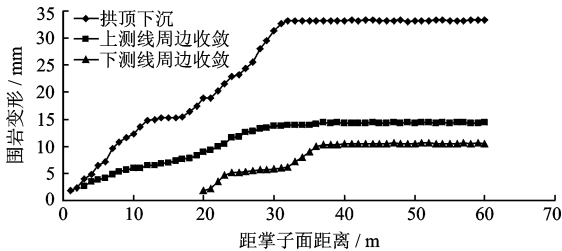


图 16 DK380+990 围岩变形与 D 的关系

Fig. 16 Relationship between surrounding rock deformation and D at DK380+990

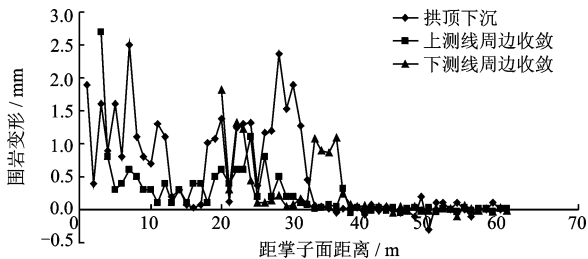


图 17 DK380+990 围岩变形速率与 D 的关系

Fig. 17 Relationship between surrounding rock deformation rate and D at DK380+990

由图 16、17 可以看出,断面 DK380+990 围岩变形与距掌子面距离的关系曲线呈“台阶”型(或“双厂”型)。随掌子面的推进,断面 DK380+990 围岩变形逐渐增大,变形速率呈跳跃式减少,但最后趋于稳定。监测断面距掌子面距离为 2.5 倍洞径时,拱顶沉降趋于稳定,在中台阶和下台阶开挖后,拱顶沉

降速率出现轻微抬升,但迅速稳定。当监测断面距掌子面的距离为 3 倍洞径处,周边收敛变形趋于稳定。

3.2 DK380+755 围岩变形和距掌子面距离的关系

断面 DK380+755 围岩变形和变形速率与距掌子面距离的关系曲线如图 18、19 所示。

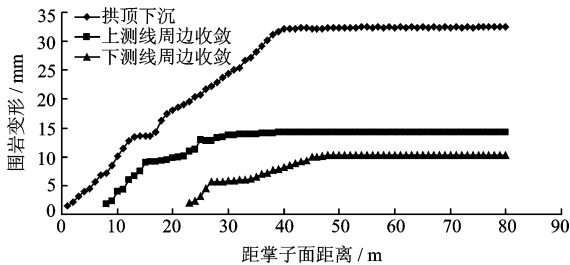


图 18 DK380+755 围岩变形与 D 的关系

Fig. 18 Relationship between surrounding rock deformation and D at DK380+775

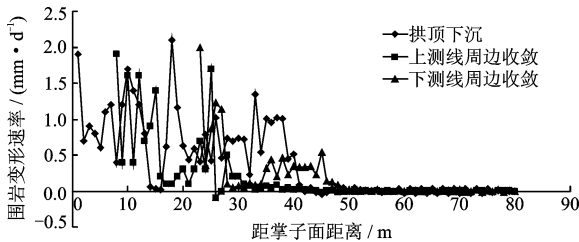


图 19 DK380+755 围岩变形速率与 D 的关系

Fig. 19 Relationship between surrounding rock deformation rate and D at DK380+775

由图 18 和图 19 可以看出,断面 DK380+755 围岩拱顶下沉变形与距掌子面距离的关系曲线呈“单厂”型,上测线周边收敛变形与距掌子面距离的关系曲线呈抛物线型,下测线周边收敛变形与距掌子面距离的关系曲线呈“双厂”型。断面 DK380+755 围岩变形随掌子面推进逐渐增大,变形速率呈跳跃式减小,但最后趋于稳定。监测断面距掌子面距离为 3 倍洞径时,拱顶沉降和上测线周边收敛变形趋于稳定,在上部弧形导坑和下部弧形导坑开挖后,拱顶沉降速率出现轻微抬升,但迅速趋于稳定。当监测断面距掌子面的距离为 4 倍洞径时,下测线周边收敛变形趋于稳定。

3.3 DK380+655 围岩变形和距掌子面距离的关系

断面 DK380+655 围岩变形和变形速率与距掌子面距离的关系曲线如图 20、21 所示。

由图 20、21 可以看出,断面 DK380+655 围岩

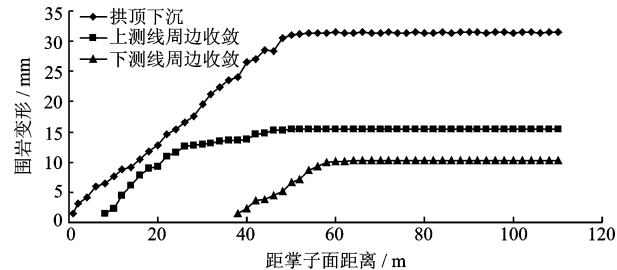


图 20 DK380+655 围岩变形与 D 的关系

Fig. 20 Relationship between surrounding rock deformation and D at DK380+655

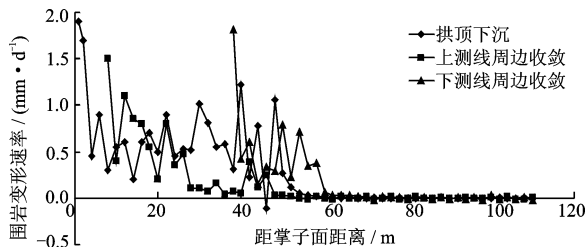


图 21 DK380+655 围岩变形速率与 D 的关系

Fig. 21 Relationship between surrounding rock deformation rate and D at DK380+655

变形与距掌子面距离的关系曲线呈“单厂”型。随掌子面向前推进,围岩变形逐渐增大,变形速率呈跳跃式减小,但最后趋于稳定。断面 DK380+655 为Ⅲ级围岩,采用台阶法开挖时掘进速度较快,监测断面距掌子面距离为 4 倍洞径时,拱顶沉降和上测线周

边收敛变形趋于稳定,在上台阶和下台阶开挖后,上测线和下测线周边收敛速率出现轻微抬升,但迅速趋于稳定。当监测断面距掌子面的距离为 5 倍洞径时,下测线周边收敛变形趋于稳定。

3.4 特大断面隧道围岩变形空间效应总结分析

由以上分析可知,特大断面隧道围岩变形与距掌子面距离的关系曲线呈现以下特征:

(1)围岩变形—距掌子面距离关系曲线基本上可以分为两种类型,即“台阶”型(或“双厂”型)和“单厂”型。一般“台阶”型曲线出现在围岩条件差的地段(Ⅴ级围岩),当监测断面距掌子面超过 3 倍洞径时,围岩变形基本趋于稳定。“单厂”型曲线主要出现在围岩条件较好的地段(Ⅲ、Ⅳ级围岩),当监测断面距掌子面超过 5 倍洞径时,围岩变形趋于稳定,空间效应趋于消失。

(2)一般情况下,隧道下台阶的围岩变形趋于稳定的时间较晚,拱顶的围岩变形趋于稳定的时间较早,上台阶的围岩变形趋于稳定的时间居于两者之间,所以二次衬砌施作的时间应该以下测线周边收敛的数据为准。

(3)为了更进一步研究隧道围岩施工期空间效应,计算在不同距掌子面距离条件下的隧道围岩径向位移释放率(表 2),隧道径向位移释放率与距掌子面距离的关系曲线如图 22 所示。

表 2 不同距掌子面距离的隧道围岩位移释放率

Table 2 Displacement releasing rate of surrounding rock under different distances to the working face

量测 断面	围岩 级别	测线	位移/ mm	不同距掌子面距离的隧道围岩位移释放率/%				
				15 m	30 m	45 m	60 m	75 m
				(约 1 倍洞径)	(约 2 倍洞径)	(约 3 倍洞径)	(约 5 倍洞径)	(约 5 倍洞径)
DK380+990	Ⅴ	拱 顶	33.30	45.89	94.29	99.79	100.00	100.00
		上测线	14.36	48.05	95.40	99.65	100.00	100.00
		下测线	10.54	—	54.93	99.72	100.00	100.00
DK380+755	Ⅳ	拱 顶	32.40	41.94	75.31	99.48	100.00	100.00
		上测线	14.28	62.32	95.94	99.86	100.00	100.00
		下测线	10.23	—	56.60	96.68	100.00	100.00
DK380+655	Ⅲ	拱 顶	31.44	62.37	90.14	100.00	100.00	100.00
		上测线	15.40	84.29	99.16	100.00	100.00	100.00
		下测线	10.30	—	44.08	98.25	100.00	100.00

注:针对围岩变形的空间效应,围岩径向位移释放率是指隧道某位置距开挖面不同距离的指向洞内的围岩变形与距开挖面足够远处(空间效应影响范围之外)的同一位置、同一方向上的围岩变形之比

不同围岩级别下隧道围岩径向位移释放率随距掌子面距离的变化规律如下:

Ⅲ级围岩。对于拱顶部位,在距掌子面距离约

1 倍洞径时,隧道围岩径向位移释放率达到 60%以上;在距掌子面距离约 3 倍洞径时,位移释放率达到 100%,空间效应消失。对于上测线部位,在距掌子

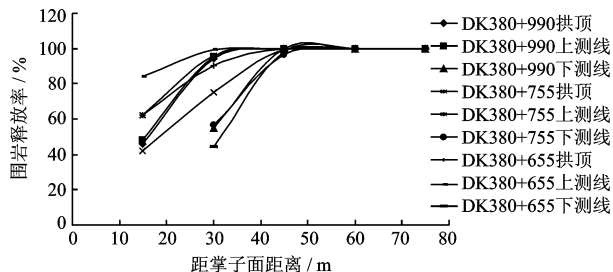


图 22 隧道围岩径向位移释放率与距掌子面距离的关系

Fig. 22 Relationship between radial displacement releasing rate of surrounding rock and the distance to the working face

面距离约 1 倍洞径时,隧道围岩径向位移释放率达到 80%以上;在距掌子面距离约 2 倍洞径时,位移释放率达到 100%,空间效应消失。对于下测线部位,在距掌子面距离约 2 倍洞径时,隧道围岩径向位移释放率达到 40%以上;在距掌子面距离约 5 倍洞径时,位移释放率达到 100%,空间效应消失。

Ⅳ级围岩。对于拱顶部位,在距掌子面距离约 1 倍洞径时,隧道围岩径向位移释放率达到 40%以上;在距掌子面距离约 3 倍洞径时,位移释放率达到 100%,空间效应消失。对于上测线部位,在距掌子面距离约 1 倍洞径时,隧道围岩径向位移释放率达到 60%以上;在距掌子面距离约 3 倍洞径时,位移释放率达到 100%,空间效应消失。对于下测线部位,在距掌子面距离约 2 倍洞径时,隧道围岩径向位移释放率达到 50%以上;在距掌子面距离约 5 倍洞径时,位移释放率达到 100%,空间效应消失。

Ⅴ级围岩。对于拱顶部位,在距掌子面距离约 1 倍洞径时,隧道围岩径向位移释放率达到 40%以上;在距掌子面距离约 3 倍洞径时,位移释放率达到 100%,空间效应消失。对于上测线部位,在距掌子面距离约 1 倍洞径时,隧道围岩径向位移释放率达到 40%以上;在距掌子面距离约 3 倍洞径时,位移释放率达到 100%,空间效应消失。对于下测线部位,在距掌子面距离约 2 倍洞径时,隧道围岩径向位移释放率达到 50%以上;在距掌子面距离约 3 倍洞径时,位移释放率达到 100%,空间效应消失。

4 结 论

(1)对不同开挖方法下的特大断面隧道施工期围岩变形时间效应进行分析,并对不同开挖方法下特大断面隧道施工期围岩变形随时间的变化规律及

围岩变形-时间特征曲线的类型(“弯弓”型和“台阶”型)进行了总结,对每种类型曲线的围岩变形阶段及变形特征进行了界定。

(2)分析了特大断面隧道施工期围岩变形与距掌子面距离之间的关系,划分了围岩变形一距掌子面距离关系曲线的类型(“单厂”型和“双厂”型),并得出了每一种类型曲线所对应的围岩级别,对二次衬砌施作的最佳时机给出了建议。

(3)通过分析隧道围岩径向位移释放率与时间和距掌子面距离之间的关系,得出了围岩级别和空间位置对特大断面隧道施工期围岩变形时间效应和空间效应的影响规律,研究结论对于确定最佳支护时机和施工工序具有重要的价值。

参考文献:

- [1] 孙 钧. 地下工程设计理论与实践 [M]. 上海:上海科学技术出版社, 1996.
Sun J. Theory and practice of underground engineering design [M]. Shanghai:Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1996. (in Chinese)
- [2] Nazary M S, Mirzabozorg H, Noorzad A. Modeling time-dependent behavior of gas caverns in rock salt considering creep, dilatancy and failure [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 33 (1): 171-185.
- [3] Ge' raldine Fabre, Fre' de' ric Pellet. Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43(5): 950-960.
- [4] Shalabi F I. FE analysis of time-dependent behavior of tunneling in squeezing ground using two different creep models [J]. Tunnel Underground Space Technology, 2005, 20(3): 271-279.
- [5] 扈世民. 基于黄土工程特性的隧道围岩空间位移分析 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 117-122.
Hu Sh M. Analysis of spatial displacement of surrounding rock based on engineering properties of loess [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(9): 117-122. (in Chinese)
- [6] 周硕安. 考虑空间效应的围岩位移释放系数的确定 [D]. 重庆:重庆大学, 2014.
Zhou Sh A. Determining the surrounding rock displacement release coefficient considering spatial effect [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)

- Chinese)
- [7] 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, 26(2): 404-409.
- Zhao X F, Wang Ch M, Kong X L. Analysis of time-space effects of construction behavior of deep soft rock tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 404-409. (in Chinese)
- [8] 赵旭峰. 挤压性围岩隧道施工时空效应及其大变形控制研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- Zhao X F. The temporal and spatial effect in construction and control of large deformation of tunnels in squeezing ground [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [9] 霍晓龙, 陈寿根, 张小明. 唐家山隧道施工特性及时空效应研究 [J]. 施工技术, 2012, 41(374): 79-83.
- Huo X L, Chen Sh G, Zhang X M. Study on construction characteristic and temporal-spatial effect of Tangjiashan tunnel [J]. Construction Technology, 2012, 41(374): 79-83. (in Chinese)
- [10] 孙元春, 尚彦军. 岩石隧道围岩变形时空效应分析 [J]. 工程地质学报, 2008, 16(2): 211-215.
- Sun Y Ch, Shang Y J. Intergrated analysis of the tempo-spatial effect of surrounding rock deformation in tunneling [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(2): 211-215. (in Chinese)
- [11] 张向东, 盛超, 王学军. 庙岭隧道基于时空效应的围岩稳定性分析 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(6): 888-895.
- Zhang X D, Sheng Ch, Wang X J. Stability analysis of Miaoling tunnel wall rock based on time-space effect [J]. Journal of Guangxi University (Nature Science Edition), 2010, 35(6): 888-895. (in Chinese)
- [12] 施成华, 彭立敏, 赵丹. 考虑时空效应的隧道开挖及降水引起的地层变形计算 [J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 91-96.
- Shi Ch H, Peng L M, Zhao D. Calculation of stratum deformation caused by tunnel excavation and dewatering [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 91-96. (in Chinese)
- [13] 谭代明, 漆泰岳, 莫阳春. 考虑时空效应的软弱围岩隧道施工稳定性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2009(4): 85-94.
- Tan D M, Qi T Y, Mo Y Ch. Study on construction stability of soft surrounding rock tunnel considering time-space effect [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, (4): 85-94. (in Chinese)
- [14] 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, 31(2): 57-62.
- Chen X X, Xia C Ch, Miao Y B. Time-space effect in fractional steps constructions tunnels by key block theory [J]. Journal of Chang'an University (Nature Science Edition), 2011, 31(2): 57-62. (in Chinese)
- [15] 吴波, 刘维宁, 高波, 等. 城市浅埋隧道施工性态的时空效应分析 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 340-343.
- Wu B, Liu W N, Gao B, et al. Analysis of space-time effect for urban shallow tunneling by excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 340-343. (in Chinese)
- [16] 张春阳. 铝土矿围岩性质时空效应与巷道稳定性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- Zhang Ch Y. Surrounding rock properties time-space effect and roadway stability research in underground bauxite mine [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [17] 张常光, 曾开华. 等值地应力下岩质圆形隧道位移释放系数比较及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 1-13.
- Zhang Ch G, Zeng K H. Comparisons and applications of displacement release coefficients for a circular rock tunnel subjected to isotropic geostresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 1-13. (in Chinese)
- [18] 郭瑞, 方勇, 何川. 隧道开挖过程中应力释放及位移释放的相关关系研究 [J]. 铁道工程学报, 2010(9): 46-50.
- Guo R, Fang Y, He Ch. Study on the correlation between stress release and displacement release during tunnel excavation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(9): 46-50. (in Chinese)

