

太白山隧道变形规律及预留变形量研究

周 君

(中国铁建投资集团有限公司,北京 100855)

摘要:为掌握隧道施工变形规律,并以此设置合理的预留变形量,以在建的太白山隧道为工程依托,通过现场实测与统计拟合分析,研究了在不同围岩级别条件下的变形规律及合理预留变形量。结果表明:1)太白山隧道变形整体呈现出沉降明显大于相对收敛的特征;2)V级深埋段和IV级软岩段变形规律相似,先后经历了急剧变形、持续增长和缓慢变形3个阶段;3)V级深埋段预留变形量偏小,建议预留变形量取150~230 mm、IV级软岩段预留变形量偏大,建议预留变形量取30~70 mm。本文结果可为类似地层的隧道施工提供一定的参考。

关键词:隧道工程;变形规律;合理预留变形量

中图分类号:TD926.4

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)01-0024-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.01.004

Research on deformation law and reserved deformation of Taibai Mountain Tunnel

ZHOU Jun

(China Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 100855, China)

Abstract: In order to understand the deformation law of Tunnel construction and set a reasonable reserved deformation based on it, the deformation law and reasonable reserved deformation under different surrounding rock levels are studied by using the Taibai Mountain Tunnel under construction as the project support through field measurement and statistical fitting analysis. The results show that: 1) The overall deformation of Taibai Mountain Tunnel shows the characteristics of significantly greater settlement than relative convergence; 2) The deformation law of the deep buried section of level V and the soft rock section of level IV are similar, and they have successively experienced three stages of rapid deformation, continuous growth and slow deformation; 3) The reserved deformation of the Grade V deep buried section is too small, and it is recommended that the reserved deformation be 150 ~ 230 mm. The reserved deformation of the Grade IV soft rock section is too large, and it is recommended that the reserved deformation be 30 ~ 70 mm. The results can provide a certain reference for tunnel construction in similar strata.

Key words: tunnel engineering; deformation law; reasonable reserved deformation

随着交通建设的快速发展和西部大开发战略的实施,我国穿越软岩地层的长大深埋隧道日益增多。在软岩地层修筑隧道时,隧道初期支护侵限、喷射混凝土开裂剥落、钢架扭曲变形、拱架频繁拆换、超欠挖等问题极易发生,严重威胁施工人员的安全、影响施工进度、增加施工成本^[1-3]。对此,除采取合理的支护措施和开挖方

法外,掌握隧道变形规律并以此设置合理的预留变形量,对于防治隧道变形灾害、控制成本造价具有重要意义^[4-5]。

目前,隧道施工中普遍存在的问题是预留变形量不满足隧道变形要求,但又缺少合理有效的确定方法。预留变形量过大,对超挖空间进行回填会导致施工成本增加;预留变形量过小,可能

收稿日期:2023-11-15

作者简介:周君(1992—),男,工程师,从事工程技术和管理工作。

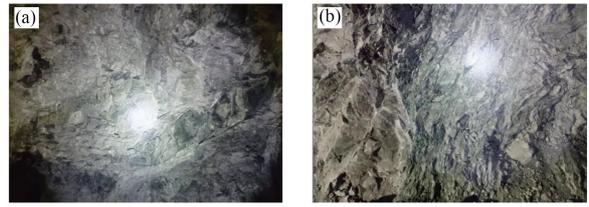
会出现初期支护侵限、拆换拱、二次衬砌厚度不足等病害问题^[6-7]。隧道预留变形量的确定, 通常是规范所给量值作为参考, 类比相似工程给出预留变形量, 但隧道变形与围岩条件、断面形状、埋深、开挖跨度及方法、支护结构形式及参数、支护时机等因素密切相关^[8-10], 且不同隧道工程的变形规律和预留变形量存在较大的差异。采用该方法确定隧道设计预留变形量时, 往往与隧道现场实际变形情况偏差较大, 极易造成上述问题的产生。

因此, 本文以在建的太白山隧道为工程依托, 采用现场调研和变形监测数据统计分析的方法, 研究太白山隧道在不同围岩级别条件下的变形规律及合理预留变形量, 以为后续设计变更及类似地层的隧道施工提供一定的指导与借鉴意义。

1 工程概况与监测方案

1.1 工程概况

太白山隧道起点位于宝鸡市眉县营头镇大理村沙坡, 终点位于太白县鹦鸽镇莲花湾沟内, 是陕西省眉县至太白高速公路项目的一项控制性工程。该隧道设计为双洞四车道分离式, 设计时速为 80 km/h。隧道净宽为 10.25 m, 净高为 5 m, 最大埋深为 486 m, 左洞全长为 5 259 m, 右洞全长为 5 274 m, 为特长隧道。隧道围岩主要为 IV 级(占比为 45.7%)、V 级(占比为 54.3%), 采用三台阶七步开挖法施工。IV 级围岩段揭示岩性主要为中风化斜长角闪片麻岩, 青灰色-深灰色, 隐晶结构, 层状、块状构造, 围岩稳定性较差; V 级围岩段揭示岩性主要为白云质大理岩、片麻岩、斜长角闪岩, 岩体极其破碎, 呈碎裂-裂隙块状结构, 围岩稳定极差。施工现场揭示围岩状态如图 1 所示。



不同级别围岩: (a) IV; (b) V

图 1 太白山隧道施工揭示围岩

1.2 隧道设计参数

太白山隧道洞身段支护衬砌按新奥法原理设计, 采用初期支护与二次衬砌相结合的复合衬砌。根据隧道埋深、围岩级别及开挖跨度的不同, 设置相适应的支护参数, 其支护结构设计详细参数如表 1 所示。

1.3 施工方案

太白山隧道 V 级围岩设计采用三台阶环形开挖留核心土法施工, IV 级围岩设计采用上下台阶开挖法施工。在实际施工中, 太白山隧道 IV 级、V 级围岩采用的施工方法均为三台阶七步开挖法(三台阶环形开挖不留核心土法), 具体施工方法如图 2 所示。

1.4 监测方案

根据《公路隧道施工技术规范》(JTG 3660.1—2020)要求, 结合太白山隧道施工方案及支护结构特点, 制定现场变形监控量测方案。现场变形监测测点布置如图 3 所示, 纵向每间隔 5 m 布设 1 个监测断面。采用全站仪对隧道拱顶沉降及水平收敛数据进行现场监测。

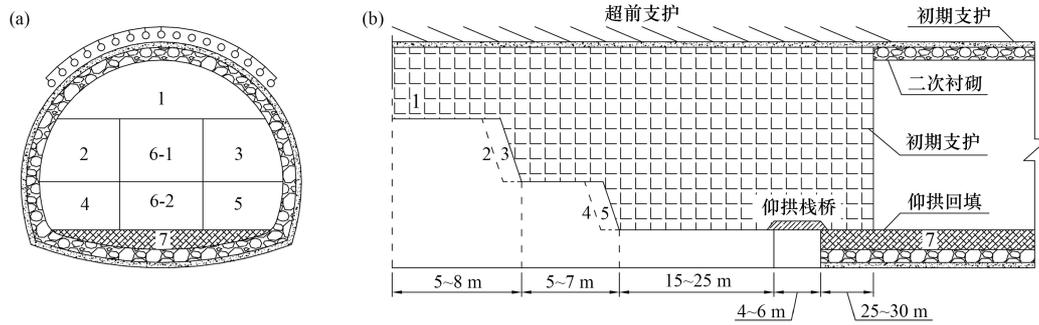
2 变形监测结果分析

2.1 变形监测结果汇总

为获取太白山隧道变形量和变形规律, 根据隧道埋深及所处围岩条件, 在太白山隧道出口端左右线 V 级深埋段、IV 级软岩段选取 37 个数据监

表 1 太白山隧道支护参数

围岩级别	超前支护/mm	初期支护			预留变形量/cm	二次衬砌厚度/cm
		钢架型号及间距/cm	锁脚锚管/杆/mm	喷射混凝土厚度/cm		
V 级加强、浅埋段	∅50 超前小导管	I20×60	2∅50 锁脚锚管	26	120	50
V 级深埋段	∅42 超前小导管	I18×80	2∅22 早强砂浆锚杆	24	100	45
IV 级软岩段	∅25 超前锚杆	I16×100	2∅22 早强砂浆锚杆	22	80	40
IV 级硬岩段	∅25 超前锚杆	I16×100	2∅22 早强砂浆锚杆	22	80	40



(a) 横断面开挖示意; (b) 纵断面开挖示意

图 2 三台阶七步开挖法平面示意

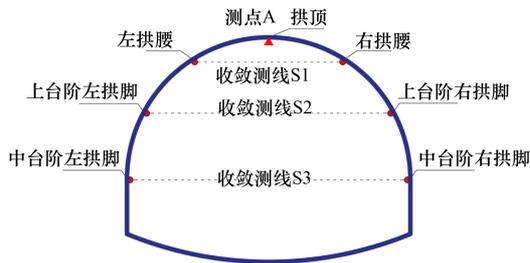


图 3 太白山隧道变形监测点布置示意

测完整的典型断面(V级深埋段 16 个、IV级软岩段 21 个), 对其变形监测结果进行统计分析。统计数据如表 2 所示。

由表 2 可知: 1) 当太白山隧道 V 级深埋段、IV 级软岩段采用三台阶七步开挖法施工时, 隧道变形均呈现出沉降明显大于相对收敛的特征; 2) 太白山隧道的变形量与围岩条件、支护参数强度密切相关, V 级深埋段变形量明显大于 IV 级软岩段, V 级深埋段拱顶沉降最大可达 239.3 mm, IV 级软岩段变形量相对较小, 拱顶沉降最大值为 70.2 mm; 3) V 级深埋段、IV 级软岩段拱顶沉降所处

主要范围分别为 89.6 ~ 239.3 mm、10.9 ~ 70.2 mm。V 级深埋段拱顶沉降平均值为 151.5 mm, 个别断面已超出设计预留变形量(100 mm), 造成局部侵限。初期支护结构强度相对较弱, 预留变形量明显不足。

2.2 变形规律分析

2.2.1 典型断面随施工工序的变形规律分析

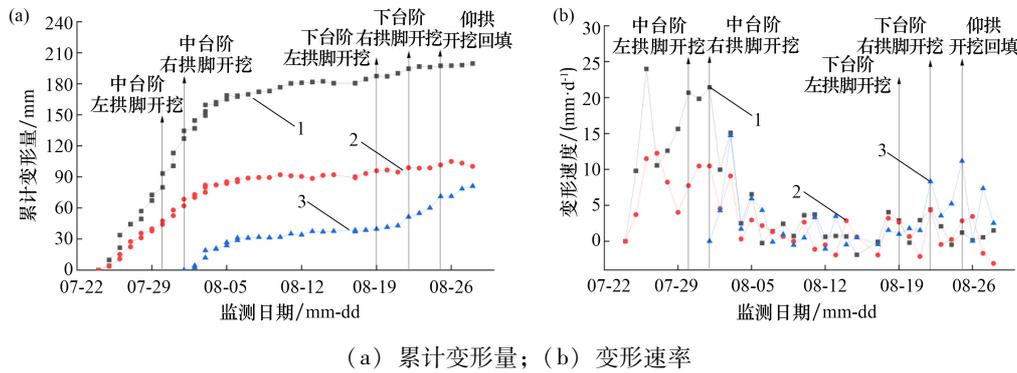
基于太白山隧道出口端 V 级深埋段、IV 级软岩段的现场变形监测数据, 从中分别选取具有代表性的典型断面绘制成变形时态曲线(由于相对收敛测线 S3 监测时间短、整体变形量小, 不再对其变形过程进行分析)。典型断面变形时态曲线如图 4、5 所示。

由图 4、5 可知: 太白山隧道 V 级深埋段和 IV 级软岩段的拱顶沉降、相对收敛随施工工序的变形规律基本相似, 从隧道开挖到仰拱施作, 先后经历了急剧变形、持续增长和缓慢变形 3 个阶段。但受开挖时间、开挖工序和围岩条件影响,

表 2 太白山隧道 V 级深埋段、IV 级软岩段变形监测结果汇总

mm

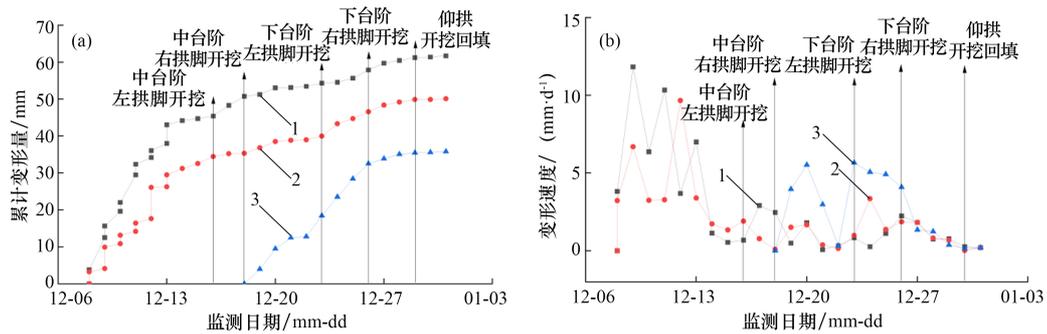
监测断面	围岩级别	拱顶沉降		相对收敛					
				S1		S2		S3	
		沉降值	平均值	收敛值	平均值	收敛值	平均值	收敛值	平均值
YK29 + 195 - YK29 + 245 (6 个断面)	V 级深埋	89.6 ~ 239.3	151.5	98.9 ~ 246.4	145.8	39.8 ~ 274.2	118.61	1.5 ~ 78.2	25.9
ZK29 + 195 - ZK29 + 255 (10 个断面)									
YK28 + 765 - YK29 + 020 (7 个断面)	IV 级软岩	10.9 ~ 70.2	32.2	8.6 ~ 65.3	33.8	1.6 ~ 88.9	24.8	0.8 ~ 20.8	4.2
YK29 + 135 - YK29 + 170 (9 个断面)									
ZK29 + 145 - ZK29 + 175 (5 个断面)									



(a) 累计变形量; (b) 变形速率

1—拱顶沉降; 2—相对收敛 S1; 3—相对收敛 S2。

图4 V级深埋段 ZK29+220 断面变形时态曲线



(a) 累计变形量; (b) 变形速率

1—拱顶沉降; 2—相对收敛 S1; 3—相对收敛 S2。

图5 IV级软岩段 YK29+170 断面变形时态曲线

V级深埋段与IV级软岩段的变形规律存在一定差异, 其具体变形规律如下。

(1) V级深埋条件下, 急剧变形阶段出现在隧道开挖后8 d内, 该阶段变形剧烈, 最大变形速率达24 mm/d。受中台阶分部开挖影响, 变形速率出现较大波动, 急剧变形持续时间延长, 变形量急剧增加; 持续增长阶段出现在隧道开挖后8~29 d, 相比急剧变形阶段, 该阶段变形速率大幅度降低, 但变形量仍在持续增长; 缓慢变形阶段出现隧道开挖29 d之后, 该阶段收敛变形受开挖工序影响明显, 变形速率存在较大波动但整体呈降低趋势, 变形量缓慢增加。根据监测数据, 初期支护闭合后仍具有较大的变形速率。

(2) IV级软岩条件下, 急剧变形阶段出现在隧道开挖后5 d内, 该阶段变形量迅速增长, 最大变形速率达11.8 mm/d, 由于围岩情况相对较好, 变形速率随开挖时间整体呈先增长而后降低趋势; 持续增长阶段出现在隧道开挖后6~19 d, 该阶段由于受中台阶分部开挖影响, 变形速率存在一定

波动, 与急剧变形阶段相比该阶段变形速率整体大幅度降低, 变形量持续增长; 缓慢变形阶段出现道开挖19 d之后, 该阶段各测点(线)的变形速率明显降低, 逐渐趋于稳定变形状态, 变形量缓慢增加。

2.2.2 典型断面随施工工序变形占比

为研究隧道变形对施工工序的影响, 对长白山隧道V级深埋段、IV级软岩段的典型断面变形量随施工工序的变化及变形占比进行分析。相关统计数据如表3所示。

由图4、5及表3可知: 隧道的变形量在不同施工阶段具有明显的差异, 这除了受围岩自身稳定性、支护结构强度的影响外, 也与各施工台阶所经历的时长相关, 如ZK29+220断面中台阶施工持续19 d, 变形量占比相对较大。隧道变形量主要发生在上台阶和中台阶施工阶段, V级深埋段在上、中台阶产生的变形量约占总量的37.5%、52.0%; IV级软岩段在上、中台阶产生的变形量约占总量的68.8%、28.5%; 仰拱施作后, 产生的变形占比最

表 3 太白山隧道不同围岩级别条件下典型断面随施工工序产生的变形量及占比

监测断面	监测位置	上台阶施工		中台阶施工		下台阶施工		仰拱施工	
		变形量/mm	占比/%	变形量/mm	占比/%	变形量/mm	占比/%	变形量/mm	占比/%
ZK29 + 220 (V级深埋段)	拱顶沉降	72.6	36.4	111.9	56.1	12.9	6.5	2.2	1.1
	相对收敛 S1	39.7	38.6	53.7	52.2	8.2	8.0	1.3	1.3
	相对收敛 S2	—	—	38.7	47.7	36.6	40.1	9.9	12.2
YK29 + 170 (IV级软岩段)	拱顶沉降	44.7	72.4	9.6	15.6	6.2	10.0	1.2	1.9
	相对收敛 S1	32.6	65.1	7.4	18.4	9.2	14.8	0.9	1.8
	相对收敛 S2	—	—	18.4	51.4	16.7	46.6	0.7	2.0

小, V级深埋段约占总变形量的4.9%、IV级软岩段约占总变形量的1.9%。究其原因如下。

(1) 太白山隧道V级深埋段、IV级软岩段超前支护参数分别为 $\varnothing 42$ mm超前小导管、 $\varnothing 25$ mm超锚杆。隧道上台阶开挖后,由于超前加固措施强度不足、拱脚采用2 $\varnothing 22$ mm早强砂浆锁脚锚杆,初期支护拱脚缺乏足够的约束,上台阶开挖期间一直保持着较大的变形速率,这加剧了初期支护的整体变形。受围岩自身稳定影响,V级深埋段在上台阶开挖期间变形更为强烈。

(2) 隧道中台阶开挖后,初期支护尚未封闭成环,受分部开挖及拱脚地基承载力的影响,变形速率存在一定波动,变形量处于持续增长状态。同时,中台阶作为大型施工机械的操作平台,其台阶长度及所占用施工时长相对较长,导致初期支护变形量增加;在仰拱施作、初期支护封闭成环后,隧道变形得到有效控制。因此,应在保证隧道施工场地的前提下,缩短台阶长度,减少初期支护封闭成环的时间。

2.3 监测数据回归分析

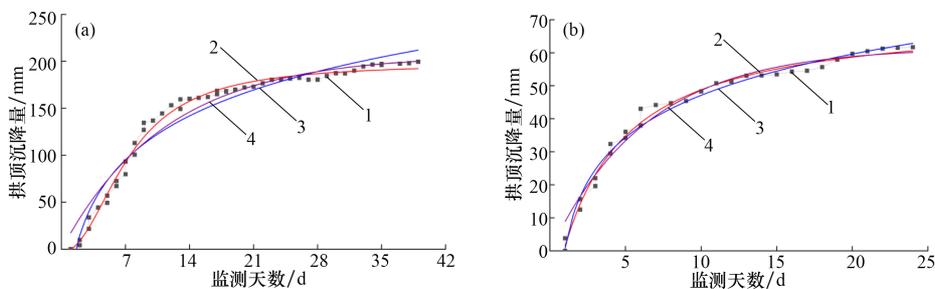
隧道变形以沉降为主,且二次衬砌施作前部分监测数据缺失。为预测二次衬砌施作时的累计

变形量,分别选取 logistic 函数、指数函数和对数函数对典型断面的拱顶沉降监测数据进行回归分析。拟合曲线如图6所示,拟合函数及结果如表4所示。由图6及表4可知:3种回归函数都有较好的拟合效果,其相关系数均在0.95以上。鉴于监测断面初期支护闭合后仍具有较大的变形速率,选取对数函数更适合预测二次衬砌施作时累计沉降量。以此预测值作为隧道预留变形量的上限值,最大程度地避免隧道初期支护结构变形侵限。

3 合理预留变形量分析

参考规范中的预留变形量建议值或类比相似工程中的预留变形量,极易造成预留变形量过大或过小。《公路隧道施工技术规范》(JTG 3660.1—2020)所给的参考预留变形量如表5所示。

综合上述分析,对比表2~5可知:对于IV级软岩段,设计预留变形量和规范建议预留变形量与现场实际变形量相比偏大;对于V级深埋段,设计预留变形量和规范建议预留变形量与现场实际变形量相比明显偏小。根据现场调研及监控量测数据分析结果,太白山隧道施工采用三台阶七步开挖法、V级深埋段及IV级软岩段采用表2所



(a) V级深埋段 ZK29 + 220 断面; (b) IV级软岩段 YK29 + 170 断面

1—现场实测值; 2—logistic 函数; 3—对数函数; 4—指数函数。

图 6 太白山隧道出口端典型断面拱顶沉降拟合曲线

表4 典型断面拱顶沉降变形回归分析结果

监测断面	实测最大值/mm	预测值(二次衬砌施作时)/mm	函数类型	回归函数	相关系数
ZK29+220 (V级深埋段)	199.6	194.9	logistic 函数	$U = 197.68 - \frac{200.64}{(1 + (t/7.31)^{2.14})}$	0.990 9
		199.4	指数函数	$U = 206.97(1 - e^{-0.09t})$	0.959 1
		234.4	对数函数	$U = 69.13\ln(t + 0.26) - 41.72$	0.956 5
YK29+170 (IV级软岩段)	61.7	64.4	logistic 函数	$U = 70.99 - \frac{87.70}{(1 + (t/3.57)^{1.05})}$	0.990 8
		61.6	指数函数	$U = 61.56(1 - e^{-0.16t})$	0.974 2
		71.8	对数函数	$U = 17.62\ln(t + 0.30) + 7.09$	0.985 8

表5 隧道开挖预留变形量规范建议值 mm

围岩级别	隧道类别	预留变形量
IV级	双车道隧道	50~80
	三车道隧道	80~120
V级	双车道隧道	80~120
	三车道隧道	100~150

列支护参数时,建议V级深埋段预留变形量取150~230 mm、IV级软岩段预留变形量取30~70 mm。在实际施工中,应结合现场监控量测数据和采取的变形控制措施,对预留变形量适当调整,以实现隧道变形控制的动态管理。

4 结 论

(1) 太白山隧道的变形量与围岩条件、支护参数强度密切相关,V级深埋段初期支护结构强度相对较弱,其变形量明显大于IV级软岩段,预留变形量明显不足。

(2) 隧道变形整体呈现出沉降明显大于相对收敛的特征。隧道V级深埋段和IV级软岩段的拱顶沉降、相对收敛变形规律基本相似,随施工工序先后经历了急剧变形、持续增长和缓慢变形3个阶段。

(3) 隧道变形量主要产生在上台阶和中台阶施工阶段,在此期间产生的变形是影响预留变形量主要因素。应优化超前支护结构参数及施工工序、缩短台阶长度,减少初期支护闭合成环的时间,降低在上、中台阶施工期间产生的变形量。

(4) 根据现场调研及监控量测数据分析结果,太白山隧道施工采用三台阶七步开挖法、本文所列支护参数时,V级深埋段预留变形量偏小,建议预留变形量取150~230 mm、IV级软岩段预留

变形量偏大,建议预留变形量取30~70 mm。

(5) 由于监测数据有限,统计分析结果难免会出现误差。在实际施工中,应综合考虑围岩条件、开挖方法、支护结构形式及参数、支护时机等各种因素的影响,并根据现场监测,对预留变形量建议值的合理性做进一步的验证分析。

参考文献:

- [1] 何昌国. 软弱围岩大跨隧道合理预留变形量分析及初期支护刚度优化[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(增刊2):227-231.
- [2] 吴发展. 木寨岭隧道软弱围岩施工技术[J]. 施工技术,2018,47(增刊4):1326-1330.
- [3] 张立鑫,陈丽俊,陈建勋,等. 单斜构造软硬互层围岩隧道变形特征及控制对策[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(6):186-196.
- [4] 赖金星,樊浩博,来弘鹏,等. 软弱黄土隧道变形规律现场测试与分析[J]. 岩土力学,2015,36(7):2003-2012;2020.
- [5] 陈丽俊,陈建勋,罗彦斌,等. 深埋大跨度绿泥石片岩隧道变形规律及合理预留变形量[J]. 中国公路学报,2021,34(6):147-157.
- [6] 孙国凯,张成良. 公路隧道软弱围岩预留变形量的研究[J]. 公路,2016,61(2):213-218.
- [7] 吴勇,王勇,张永杰. 丽香高速某破碎围岩隧道预留变形量研究[J]. 公路,2018,63(5):309-313.
- [8] 王鹏. 台阶法施工中下台阶开挖对预留变形量的影响[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(5):1077-1081.
- [9] 刘建友,赵勇,李鹏飞. 隧道围岩变形的尺寸效应研究[J]. 岩土力学,2013,34(8):2165-2173.
- [10] 李鹏飞,赵勇,刘建友. 隧道软弱围岩变形特征与控制方法[J]. 中国铁道科学,2014,35(5):55-61.