

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.12.011

软岩大变形隧道支护结构响应规律研究

王治才¹, 孙巍锋², 杨万里³, 王凯⁴, 罗鑫⁴

(1. 甘肃长达路业有限责任公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
3. 甘肃路桥公路投资有限公司, 甘肃 兰州 730000; 4. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为揭示软岩大变形隧道支护结构的响应规律,以甘肃省某长大埋深软岩大变形隧道作为研究对象,监测了典型断面的初支变形、初支拱架受力、围岩-初支间接触压力、初支-二衬间接触压力和二衬混凝土受力情况,分析了初支变形及其速率的时间演化规律,并根据各支护体系间接触压力的断面分布模式分析了软岩大变形隧道支护结构的协同作用机理。结果表明:初支变形过程可分为下导支护前的快速增长阶段、下导支护后的正常增长阶段和仰拱闭合后的缓慢增长阶段;对于局部隧道段落,较差的围岩质量导致软岩大变形隧道初支变形速率在2个月后仍难以达到规范规定的围岩稳定标准,建议初支采用强刚性主动支护方案;受围岩产状和质量的控制,围岩层状岩体表现出滑移变形和溃屈变形2种类型,进而致使初支拱架受力分布规律呈现出两侧受拉-顶部受压和顶部受拉-两侧受压2种类型;围岩-初支间的接触压力与初支-二衬间的接触压力分布规律呈现出沿着岩层走向偏压型和垂直岩层走向偏压型2种类型;二衬在承受来自初支的接触压力后进行了应力调整分配,导致了不同部位承受拉压力的差异性,但其仍具有较高的安全储备。研究成果可为软岩大变形隧道的合理设计、施工、监测和处置提供参考。

关键词:隧道工程;支护结构变形;现场监测;软岩隧道;协同作用

中图分类号:U456.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2021)12-0091-09

Study on Response Regularity of Tunnel Supporting Structure Characterized with Soft-rock Large Deformation

WANG Zhi-cai¹, SUN Wei-feng², YANG Wan-li³, WANG Kai⁴, LUO Xin⁴

(1. Gansu Changda Highway Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730030, China;
2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
3. Gansu Luqiao Highway Investment Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730000, China;
4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: To reveal the response regularity of tunnel supporting structure characterized with soft-rock large deformation, taking a tunnel characterized with soft-rock large deformation in Gansu Province as a study object, the deformation and arch stress of initial support, the contact pressure between surrounding rock and initial support, the contact pressure between initial support and second lining, and the concrete stress of second lining are monitored. The diachronic changes of initial support deformation and its velocity are analyzed, and the synergy mechanism of supporting structure of soft rock tunnel with large deformation is analyzed according to the cross-sectional distribution pattern of contact pressure between different supporting systems. The result shows that (1) the deformation process of initial support generally includes high-speed growth stage before the supporting of pilot tunnel below, normal-speed growth stage after the supporting of pilot tunnel below, and slow growth stage after inverted arch closing; (2) for partial tunnel sections, poor

收稿日期:2021-03-31

基金项目:国家自然科学基金项目(42041006);甘肃省交通运输厅科技项目(2020-30)

作者简介:王治才(1974-),男,甘肃靖远人,高级工程师。(gs_zhicaawang@163.com)

surrounding rock quality caused the deformation rate of the initial support of soft rock tunnel with large deformation is still difficult to reach the standard of surrounding rock stability after 2 months, so it is recommended to adopt a strong rigid active support scheme for the initial support; (3) controlled by attitude and quality of surrounding rock, stratified surrounding rock mass shows slip and buckling deformation, as a result, the arch stress distribution patterns of initial support show both side tension-top compression type and top tension-both side compression type; (4) the distribution patterns of contact pressure between surrounding rock and initial support, and contact pressure between initial support and second lining show biased type along rock stratum strike and biased type perpendicular to rock stratum strike; (5) after bearing the contact pressure from initial support, the stress of second lining is redistributed, causing the difference of tension and pressure at different positions, but it still has a high safety reserve. The study result can provide a reference for rational design, construction, monitoring and disposal of the soft rock tunnels characterized with large deformation.

Key words: tunnel engineering; deformation of supporting structure; field monitoring; soft rock tunnel; synergistic effect

0 引言

公路交通的飞快发展产生了数量众多的山区公路隧道,其中某些公路隧道因穿越地质条件复杂区域而使得隧道病害频发,给隧道的顺利施工造成了诸多困难^[1-5]。软岩大变形灾害是隧道施工的世界性难题,软弱围岩在地应力与水等因素作用下会产生具有累计时间效应的不可约束塑性变形^[6],大变形控制在保障软岩隧道安全施工过程中起着重要作用。为此,一些学者开展了软岩大变形隧道的相关研究。

研究主要集中在隧道软岩大变形机制与处治措施方面。张羽军等^[5]研究了成都—贵阳高速铁路高坡隧道中出现的煤系地层软岩大变形病害,认为软质岩强度低、地下水、围岩膨胀性、地应力、群洞效应等综合因素导致了大变形灾害的发生,并建议加强初期支护强度。高美奔等^[6]对国内外12座软岩大变形隧道进行了分析,认为恒阻大变形锚杆^[7]、小直径锚索与钢纤维喷射混凝土等特殊支护措施在处治软岩大变形隧道方面具有广阔应用前景。Kimura等^[8]与Ayaydin等^[9]先后在日本与奥地利的软岩大变形隧道中采用可伸缩支架与长锚杆控制大变形。胡鹏等^[10]验证了长锚杆措施在白马隧道软弱围岩变形控制中的有效性和实用性。李国良等^[11]介绍了乌鞘岭软岩大变形隧道采用双层初支与双层衬砌的支护方案。雷升祥等^[12]开展了理论和数值模拟分析研究,认为环向让压支护有刚—柔—刚的优良受力特性,可与高地应力软岩的流变相适应。何满潮等^[13]基于能量释放的让压支护理念,发明了自适

应钢拱架支点用于软岩大变形隧道,能够显著降低围岩压力。此外,一些学者基于现场监测分析了软岩大变形隧道的变形特征和稳定性。伍毅敏等^[14]探索采用激光监测技术开展隧道大变形灾害远程监测。王英帆等^[15]对高地应力软岩大变形隧道的围岩变形、钢拱架应力、围岩压力进行了现场监测,揭示了上台阶开挖过程是围岩变形快速增长阶段与初期钢拱架主要受压力阶段等规律,建议施工时可采用“先让后抗”的方法。郭健等^[16]监测了公路炭质板岩软岩大变形隧道的围岩变形、初支与二衬内力,揭示了上台阶开挖是围岩变形的的主要阶段,围岩变形呈“左小右大”的不对称模式,断面的钢拱架应力分布呈“上大下小”模式。李磊等^[17]开展了挤压性破碎软岩大变形隧道现场监测研究,揭示了施工期间围岩变形量大、速率快且持续时间长,围岩的挤压流动现象明显,初支钢架多为屈服承载或破坏。总体来看,针对软岩大变形隧道的处治措施研究较多,基于现场监测数据对软岩大变形隧道支护结构的响应规律研究还相对较少。

不同地区软岩大变形隧道往往具有不同的特点,开展不同类型软岩大变形隧道支护结构响应规律的现场实测研究,有利于了解真实的围岩变形、支护结构受力与围压压力的规律和模式,以便确保合理的设计与施工。为此,以甘肃某偏压层状软岩大变形隧道为研究对象,根据现场监测数据,对典型断面的初支变形、初支拱架受力、围岩—初支间接触压力、初支—二衬间接触压力和二衬混凝土受力情况进行分析,以揭示隧道支护结构响应规律及其协调变形机理。

1 工程概况

甘肃省某分离式双向四车道公路沿线的长大埋深软岩大变形隧道, 全长 3.7 km, 最大埋深 1 030 m。隧道断面净宽与净高分别为 10.25 m 和 12 m, 隧道左右洞净距 35 m。隧道围岩以节理发育和强度低的千枚岩为主, 围岩岩块单轴抗压强度平均值约为 10 MPa, 围岩等级为Ⅳ级。隧道大致走向为 NE31°, 围岩岩层产状近似为 110°∠60°。隧道建设区内的最小与最大水平主应力范围分别为 7.4 ~ 9.6 MPa 和 10.3 ~ 11.5 MPa。最大水平主应力方向范围为 SE45° ~ SE59°。在隧道施工与支护过程中, 隧道掌子面、围岩、支护结构与仰拱分别易产生坍塌、大变形、开裂和隆起病害。隧道开挖采用三台阶方法, 支护加固基于新奥法, 围岩加固措施及参数见表 1。

表 1 围岩加固措施及参数

Tab. 1 Measures and parameters of surrounding rock reinforcement				
加固措施		具体参数	备注	
超前支护	型号	φ42	—	
	长度/m	4.5		
	横向间距/m	0.45		
	纵向间距/m	3.0		
	拱顶布设范围/(°)	120		
初支	钢拱架型号		H175	初支预留变形量为 40 cm,
	C25 混凝土厚度/cm		24	次层隧道仰拱内不设
	首层初支	型号	R27 中空注浆锚杆	置钢拱架
		长度/m	6.0	
		横向间距/m	0.75	
	初支	纵向间距/m	1.0	
		次层钢拱架型号		I20a
	初支	C25 混凝土厚度/cm		26
		C25 混凝土厚度/cm		50
二衬	钢筋网片	型号/直径	HRB335/φ25	—
		间距/cm	25	
	钢筋网片	型号/直径	HRB335/φ25	
		间距/cm	20	
	箍筋	型号/直径	HPB300/φ8	
		间距/cm	20	

2 监测方案

为预防隧道变形破坏的发生, 揭示隧道支护结构响应规律, 选择隧道典型断面开展初支拱顶下沉、初支水平收敛变形、围岩与初支间接触压力、初支

拱架受力、初支与二衬间接触压力和二衬混凝土受力监测, 具体监测方案如图 1 所示。拱顶下沉监测点与水平收敛监测点(变形监测点)设在首层初支上, 监测点 m1 与 m3 用于监测水平收敛, 监测点 m2 用于监测拱顶下沉。拱顶下沉监测设备采用自动安平水准仪(AT-G2 型, 测量精度 0.1 mm)与钢钢尺, 水平收敛监测仪器采用数字显示式收敛计(JSS30A 型, 测量精度 0.1 mm)。接触压力、拱架受力和混凝土受力监测分别采用振弦式土压力盒、表面应变计和埋设式应变计, 其现场布设情况见图 2。土压力盒设置在围岩和首层初支之间用以监测二者间的接触压力, 设置在次层初支与二衬之间用以监测二者间的接触压力。表面应变计轴向与隧道走向保持垂直, 焊接在首层初支 H175 型钢拱架上的 2 个卡扣将其固定, 用以监测钢拱架受力情况。埋入式应变计轴向与隧道走向垂直, 用扎丝固定在二衬钢筋网的主筋上, 用于监测二衬混凝土的受力情况。各断面具体监测方案见表 2。

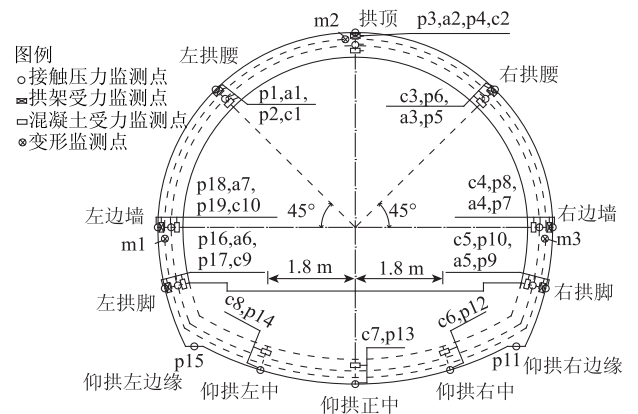


图 1 典型隧道断面监测方案

Fig. 1 Monitoring scheme of typical tunnel section

3 监测结果分析

3.1 首层初支拱顶下沉与水平收敛

监测断面的首层初支拱顶下沉量及其速率历时曲线见图 2, 水平收敛及其速率历时曲线见图 3。从拱顶下沉与水平收敛曲线的整体变化趋势来看, 初支变形可呈现明显的 3 阶段变形特点: 下导支护前的快速增长阶段、下导支护后的正常增长阶段、仰拱闭合后的缓慢增长阶段。

隧道上导洞开挖会造成围压的应力重分布, 而上导洞支护结构的拱脚支撑在软弱岩体上, 且上导洞支护强度还在不断增加, 导致了拱顶下沉与水平收敛在下导支护前的快速增长。下导洞支护后, 围

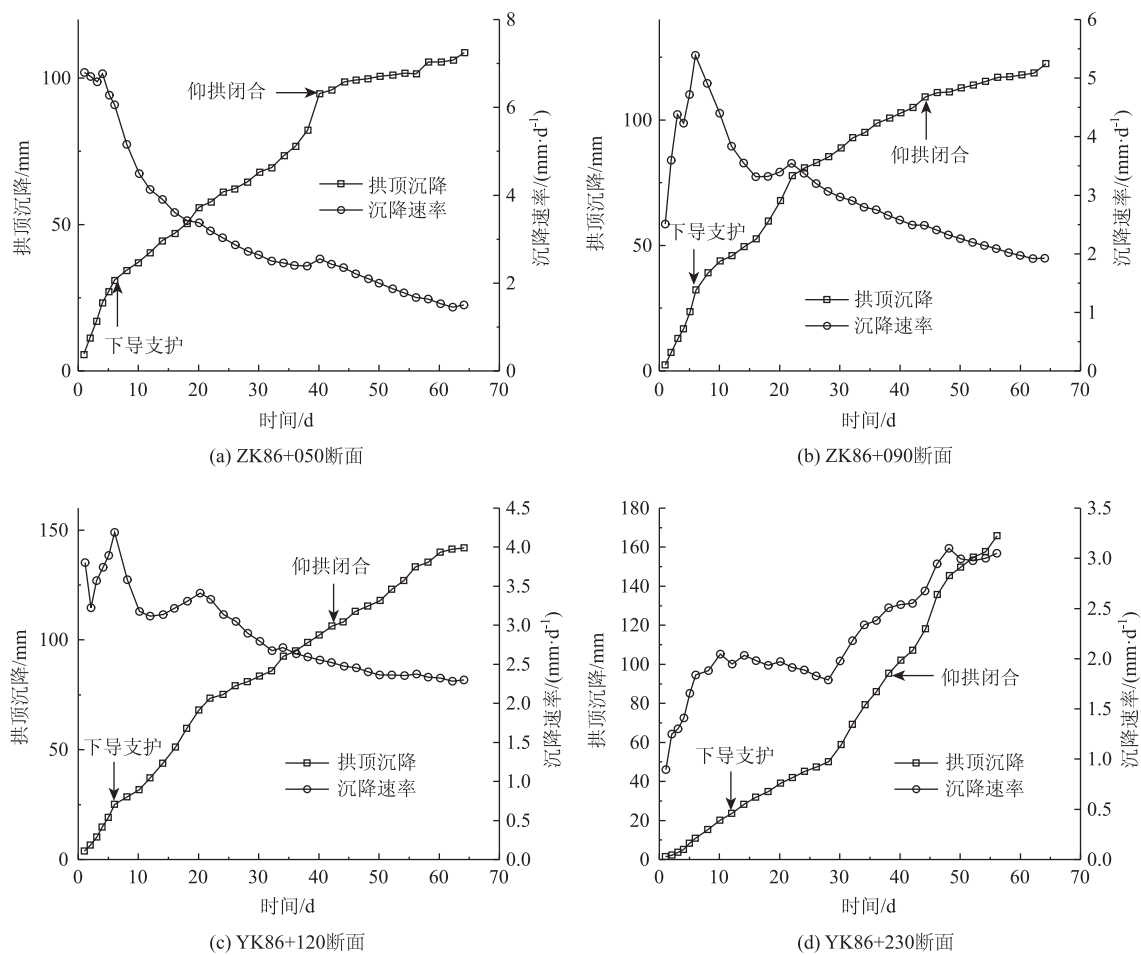


图 2 首层初支拱顶下沉量及其速率历时曲线

Fig. 2 Duration curves of crown settlement and its velocity of first layer initial support

表 2 隧道典型断面监测方案

监测断面	监测方案			
	拱顶下沉	钢拱架受力	接触压力	二衬混凝土受力
ZK86 + 050	√	√	—	—
ZK86 + 070	—	√	—	—
ZK86 + 090	√	√	√	√
YK86 + 120	√	√	√	√
YK86 + 230	√	—	—	—

岩应力重分布调整有所变弱，加之下导洞支护结构会支撑在预制混凝土块上，导致拱顶下沉与水平收敛在下导洞支护后的正常增长。仰拱封闭后，隧道初支拱架形成整体圆状受力结构，围岩应力重分布调整更弱，导致了拱顶下沉与水平收敛在仰拱闭合后的缓慢增长。断面 YK86 + 230 的拱顶下沉在仰拱闭合后表现出快速增长趋势，这主要受断面附近更差的围岩质量影响。围岩质量越差，初支结构受力越大，导致在局部受力较大的拱架连接处出现混

凝土开裂现象，从而使得拱顶下沉在仰拱闭合后表现出快速增长特征。

从拱顶下沉与水平收敛曲线的最终量值来看，ZK86 + 050，ZK86 + 090，YK86 + 120，YK86 + 230 断面的拱顶下沉量在 60 d 左右后分别达到 108，122，142，166 mm，平均拱顶下沉量约为 135 mm。拱顶下沉速率在 60 d 左右后分别达到 1.7，1.9，2.2，3.0 mm/d，平均拱顶下沉速率为 2.2 mm/d。水平收敛量在 60 d 左右后分别达到 243，220，225，171 mm，平均水平收敛量约为 215 mm，平均相对水平收敛量约为 2%。水平收敛速率在 60 d 左右后分别达到 3.7，3.4，3.5，2.5 mm/d，平均水平收敛速率为 3 mm/d。仅从拱顶下沉速率和水平收敛速率最终量值来看，不能满足规范^[18]上围岩变形速率小于 0.2 mm/d 时才基本稳定的一般规定。可见，对于软岩大变形隧道，蠕变持续时间较长，若通过变形速率判断围岩稳定性状态需 2 个月以上或更长时间，易耽误施工工期，且可能造成围岩及支护结构的变

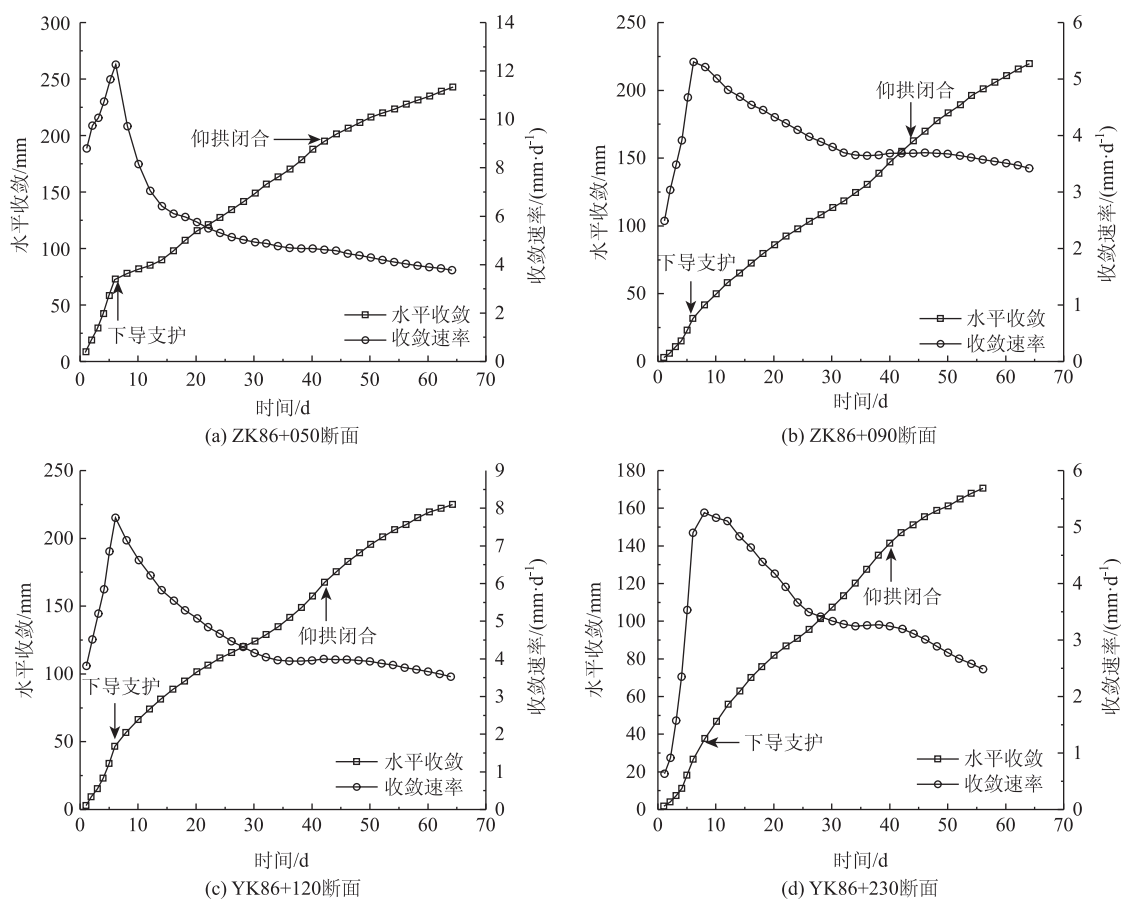


图3 首层初支水平收敛及其速率历时曲线

Fig. 3 Duration curves of horizontal convergence and its velocity of first layer initial support

形破坏。

所监测的软岩大变形隧道基于新奥法施工,采用了“让压为主且先让后抗”的支护理念,对于初支的柔性支护而言,需要与软弱围岩一起协调变形以便达到新的稳定平衡。因监测隧道岩性软且自稳性差,具有明显的蠕变特点,长期蠕变容易导致围岩松动圈的充分扩展,使得初期支护的软弱围岩较难发挥作为支护承载体组成部分的作用。因此,对于类似大软岩大变形隧道,初期支护应采用强刚性主动支护方案,张羽军等^[5]的研究也印证了此点。

3.2 首层初支拱架受力

各监测断面首层初支拱架受力分布见图4。由图4可知,监测断面首层初支拱架受力并不均匀,有的部位受拉,有的部位受压,总体规律呈现两侧受拉-顶部受压和顶部受拉-两侧受压2种类型。拱架受力特征表明,隧道初支作为柔性薄层与围岩产生了协调变形,且围岩的地质特征决定了初支拱架的受力状态。

因隧址区岩层倾向与隧道走向近似平行且岩层

倾角约 60° ,隧道围岩开挖后形成临空空间,在初支后会存在滑移变形(沿着岩层走向的围岩变形)和溃屈变形(垂直于岩层走向的围岩变形)2种情况,如图5所示。当以沿着岩层走向的围岩变形为主时,沿岩层走向的岩体质量较差且变形较大,围岩变形会主要挤压初支拱架顶部,导致拱顶拱架以受压为主(图5(a))。当以垂直岩层走向的围岩变形为主时,垂直于岩层走向的岩层较薄、较差且变形较大,围岩变形会主要挤压初支拱架两侧,导致两侧拱架以受压为主(图5(b))。监测断面ZK86+050与ZK86+070拱架受力分布形式为两侧受拉-顶部受压型,最大拱架拉力与最小拱架压力分别为258.2 MPa与-248.9 MPa,反映了隧道断面以沿着岩层走向的围岩变形为主;监测断面ZK86+090与YK86+120拱架受力分布形式为顶部受拉-两侧受压型,最大拱架拉力与最小拱架压力分别为289.3 MPa与-380.0 MPa,反映了隧道断面以垂直于岩层走向的围岩变形为主。

3.3 围岩-初支和初支-二衬间的接触压力

监测断面围岩-初支和初支-二衬间的接触压

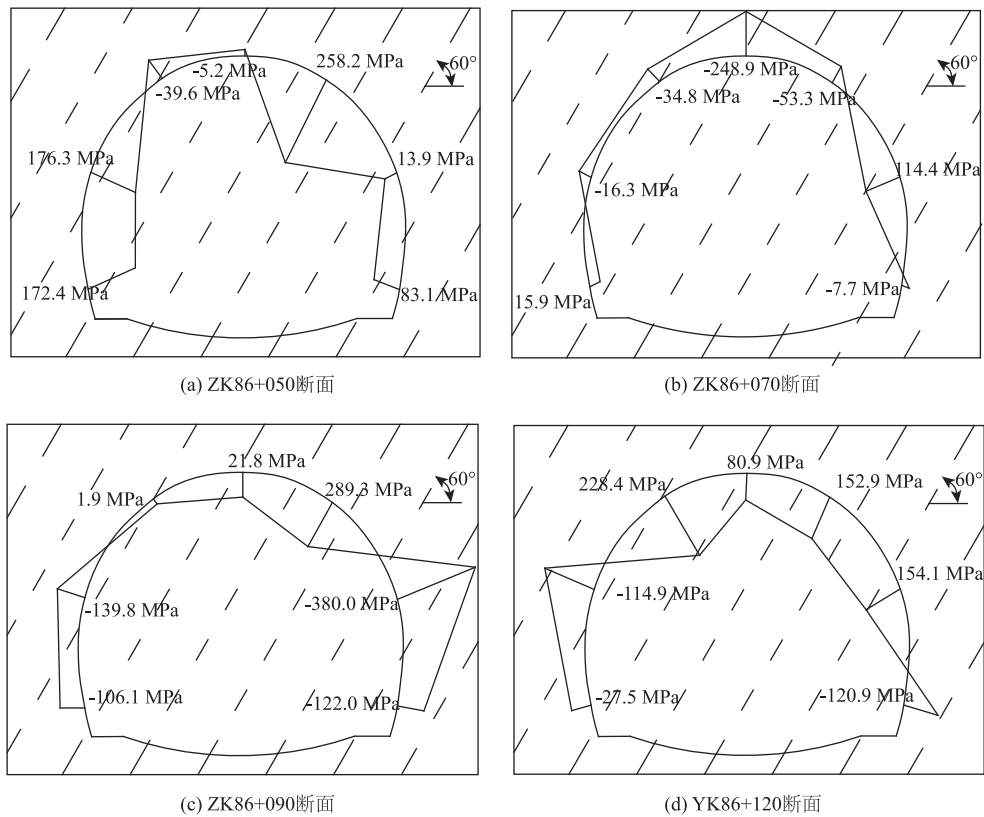


图 4 监测断面首层初支拱架受力分布 (拉为正, 压为负)

Fig. 4 Stress distributions of arches of first layer initial support in monitoring sections (positive represents tension, negative represents pressure)

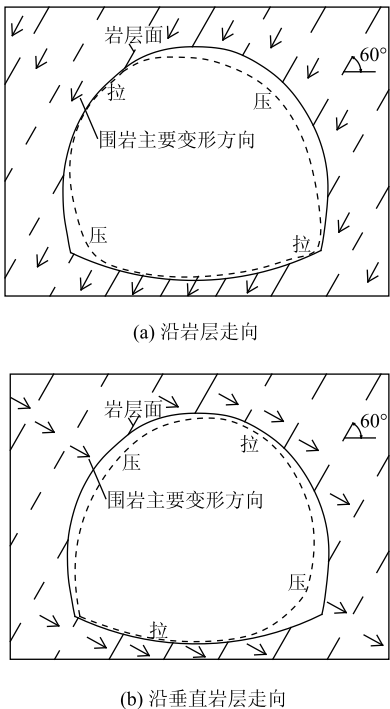


图 5 围岩变形的 2 种主要情况

Fig. 5 Two main conditions of surrounding rock deformation

力分布见图 6。由图 6 可知, 断面围岩 - 初支间接触压力和初支 - 二衬间接触压力的偏向方向出现了近似 90° 的偏转。ZK86 + 090 断面围岩 - 初支间的接触压力呈沿着岩层走向偏压型, 而初支 - 二衬间的接触压力呈垂直岩层走向偏压型; YK86 + 120 断面围岩 - 初支间的接触压力呈垂直岩层走向偏压型, 而初支 - 二衬间的接触压力呈沿着岩层走向偏压型。这种现象表明, 因二衬结构具有较大的强度和刚度, 可对初支结构的受力状态进行显著的调节。

将监测断面围压 - 初支和初支 - 二衬间的接触压力整理到表 3 中, 可用于分析初支与二衬的荷载分担情况。表 3 中初支荷载分担百分比等于围压 - 初支接触压力除以其与初支 - 二衬接触压力之和。监测断面 ZK86 + 090 与 YK86 + 120 的平均初支荷载分担百分比分别为 57.7% 和 74.5%。断面 ZK86 + 090 拱顶与右拱腰处的初支荷载分担百分比较大, 分别为 66% 和 97%; 断面 YK86 + 120 左拱腰、右拱腰和右拱脚处的初支荷载分担百分比较大, 分别为 100%, 97%, 100%。

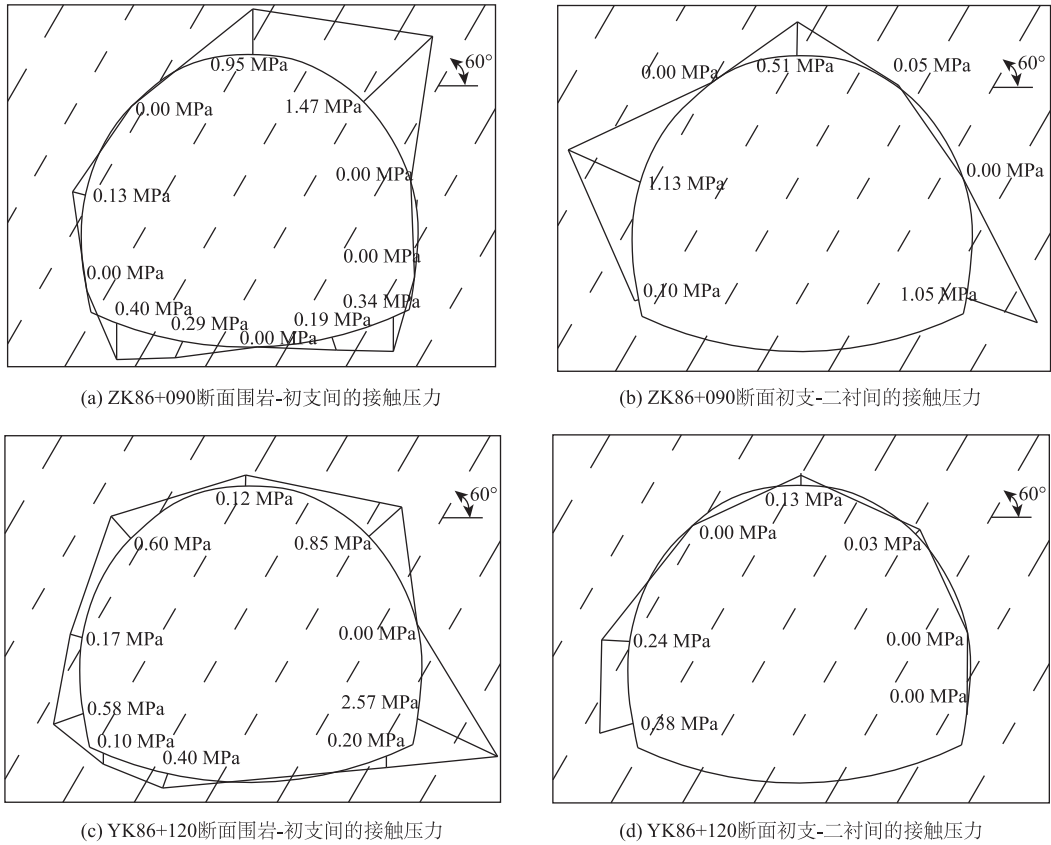


图 6 监测断面的接触压力分布

Fig. 6 Contact pressure distributions in monitoring sections

表 3 初支与二衬的荷载分担情况

Tab. 3 Load sharing situation of initial support and second lining

监测断面	监测点	围压 - 初支 接触压力/ MPa	初支 - 二衬 接触压力/ MPa	初支与二 衬荷载 分担比	初支荷载 分担百分 比/%
ZK86 + 090	P1, P2	0.00	0.00	1:1	—
	P3, P4	0.95	0.51	1.9:1	66
	P5, P6	1.47	0.05	29.4:1	97
	P7, P8	0.00	0.00	1:1	—
	P9, P10	0.00	1.05	0:1	0
	P16, P17	0.00	0.10	0:1	0
	P18, P19	0.13	1.13	1:8.7	10
YK86 + 120	P1, P2	0.60	0	1:0	100
	P3, P4	0.12	0.13	1:1.1	48
	P5, P6	0.85	0.03	28.3:1	97
	P7, P8	0.00	0.00	1:1	—
	P9, P10	2.57	0	1:0	100
	P16, P17	0.58	0.38	1.53:1	61
	P18, P19	0.17	0.24	1:1.41	41

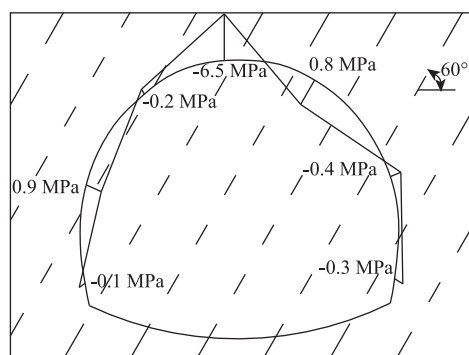
结合围岩变形与初支拱架受力分析结果可知，

当围岩以滑移变形为主时，拱顶与右拱腰处容易承受较大的围压压力，导致这些位置处的初支荷载分担百分比较大；当围岩以溃屈变形为主时，左拱腰、右拱腰和右拱脚处容易承受较大的围压压力，导致这些位置处的初支荷载分担百分比较大。此外，因围岩 - 初支间接触压力沿着岩层走向的偏压，导致在近似垂直于岩层走向的拱架内部受压；或因围岩 - 初支间接触压力垂直于岩层走向的偏压，导致在近似沿着岩层走向的拱架内部受压，使得初支 - 二衬间接触压力的偏压方向出现了近似 90° 偏转。

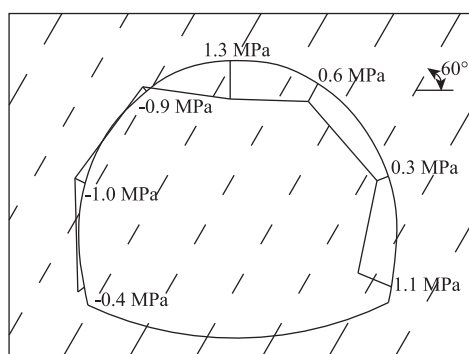
3.4 二衬混凝土受力

监测断面二衬混凝土受力分布见图 7。由图 7 可知，二衬混凝土受力也不均匀，有的地方受压，有的地方受拉；ZK86 + 090 断面二衬混凝土的最小拉应力和最大压应力分别为 - 6.5 MPa 和 0.9 MPa，YK86 + 120 断面二衬混凝土的最小拉应力和最大压应力分别为 - 1.0 MPa 和 1.3 MPa。

二衬混凝土受力的不均匀性与围压压力偏压型密切相关，在承受来自初支的接触压力后，导致二衬结构进行应力调整分配，导致不同部位承受拉压力的差异性。从表 1 可看出，二衬结构的主筋抗拉



(a) ZK86+090断面



(b) YK86+120断面

图7 监测断面二衬混凝土受力分布(拉为正,压为负)

Fig.7 Stress distributions of second lining concrete in monitoring sections (positive represents tension, negative represents pressure)

强度设计值可达到300 MPa,而混凝土的抗压强度可达到16.7 MPa。可见,隧道二衬除作为安全储备外还具有调整围压压力偏压方向的作用。

4 支护结构协同受力分析

隧道施工打破了围岩岩体的原有应力平衡,岩体为寻求新的平衡而向临空面发生持续变形,隧道各支护结构的目的是与围岩有机结合起来,形成完整的隧道支护体系,各支护结构相互补充、促进,在隧道施工及运营过程中发挥协同作用共同承受围岩压力并协助围岩承载,其本质是各支护结构之间存在增益效应,在协同作用下,各支护结构性能得到最大程度的发挥。

结合各支护结构的受力特征及隧道收敛变形情况,可知初期支护在完整支护体系中起到核心作用,隧道开挖后,围岩应力迅速调整,拱顶沉降与侧向收敛速率急剧增大,随着初支与围岩形成初始支护体系,隧道变形速率开始减小,逐渐达成新的应力平衡状态,此时初期支护作为承载围岩的主体结构,控制围岩收敛。二次衬砌除作为安全储备外还具有

调整围压压力偏压方向的作用,二次衬砌结构施加后,初期支护荷载部分通过交界面传递至二次衬砌,各支护结构进行重新应力分配,使得初支-二衬间接触压力相对围岩-初支间接触压力分布呈现近似90°偏转,此时围岩与支护体系形成新的动态平衡,隧道变形速率进一步减小,并逐渐趋于稳定,至此隧道完整支护体系形成,完整支护体系将对隧道应力释放长期发挥作用。

5 结论

以甘肃某软岩大变形公路隧道为研究对象,选择其典型断面开展了初支拱顶与水平收敛、初支拱架受力、围岩-初支间接触压力、初支-二衬间接触压力和二衬混凝土受力监测分析,对软岩大变形隧道支护结构响应规律进行了研究,得到以下主要结论:

(1) 初支变形过程可分为下导支护前的快速增长阶段、下导支护后的正常增长阶段、仰拱闭合后的缓慢增长阶段。但对于局部断面,围岩质量越差,初支结构受力越大,即使在仰拱闭合后也会导致初支变形的加速增长,此时需加强初支支护参数。

(2) 软岩大变形隧道初支变形速率在近2个月后才难以达到规范规定的围岩稳定标准,易耽误施工工期且可能导致围岩及支护结构的变形破坏。对于此类隧道而言,新奥法施工方案难以适用,建议初支采用强刚性主动支护方案。

(3) 受围岩岩体产状和质量的控制,初支拱架受力分布规律呈现出两侧受拉-顶部受压和顶部受拉-两侧受压2种类型。断面内沿着岩层走向的滑移变形导致了两侧受拉-顶部受压型的拱架受力状态,而垂直于岩层走向的溃屈变形导致了顶部受拉-两侧受压型的拱架受力状态。

(4) 围岩-初支间的接触压力与初支-二衬间的接触压力分布规律均呈现出沿着岩层走向偏压型和垂直岩层走向偏压型2种类型。围岩-初支间接触压力的分布规律不同导致拱架内部受力方式不同,从而进一步影响初支-二衬间的接触压力,使其相对围岩-初支间接触压力分布出现了近似90°的偏转。

(5) 二衬混凝土在承受来自初支的接触压力后进行应力调整分配,导致了不同部位承受拉压力的差异性,但仍具有较高安全储备。

(6) 隧道各支护体系发挥协同作用动态调整围岩压力,单一支护结构的失效可能导致整个支护体系的崩溃,对于软岩大变形隧道可结合完整支护体

系对不同结构分别设计,从而选择合适的支护方案以达到支护体系最优协同度,使各支护结构性能利用率达到最优。

参考文献:

References:

- [1] 孙庆翔,秦刚,丁国锋. 高速公路隧道灾害事件检测新方法及应用研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27 (11): 94-99.
SUN Qing-xiang, QIN Gang, DING Guo-feng. New Detection Method and Application for Expressway Tunnel Accidents and Disasters [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (11): 94-99.
- [2] 匡星,白明洲,王成亮,等. 基于模糊评价方法的隧道岩溶突水地质灾害综合预警方法[J]. 公路交通科技, 2010, 27 (11): 100-103.
KUANG Xing, BAI Ming-zhou, WANG Cheng-liang, et al. Research of Comprehensive Warning of Water Inrush Hazards in Karst Tunnel Based on Fuzzy Evaluation Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (11): 100-103.
- [3] 石州,罗彦斌,陈建勋,等. 木寨岭公路隧道大变形综合评价预测[J]. 公路交通科技, 2020, 37 (8): 90-98, 158.
SHI Zhou, LUO Yan-bin, CHEN Jian-xun, et al. Comprehensive Evaluation and Prediction of Large Deformation of Muzhailing Highway Tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (8): 90-98, 158.
- [4] 罗江,陈柱,杨建超,等. 特大断面隧道软弱钙质板岩大变形处治研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38 (4): 84-91.
LUO Jiang, CHEN Zhu, YANG Jian-chao, et al. Study on Treatment of Large Deformation of Weak Calcareous Slate in Large Section Tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (4): 84-91.
- [5] 桑运龙,赵芳,刘学增,等. 严重不良地质段隧道结构长期监测与安全评价[J]. 现代隧道技术, 2018, 55 (增2): 526-535.
SANG Yun-long, ZHAO Fang, LIU Xue-zeng, et al. Long Term Monitoring and Safety Evaluation of Tunnel Structure in Serious Poor Geological Sections [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55 (S2): 526-535.
- [6] 高美奔,李天斌,孟陆波,等. 隧道软岩大变形力学机制及防治措施综述[J]. 施工技术, 2013, 42 (增2): 247-251.
GAO Mei-ben, LI Tian-bin, MENG Lu-bo, et al. Summary of Mechanical Mechanism and Prevention Measures of Large Deformation of Surrounding Soft Rock of Tunnel [J]. Construction Technology, 2013, 42 (S2): 247-251.
- [7] 何满潮,郭志彪. 恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (7): 1297-1308.
HE Man-chao, GUO Zhi-biao. Mechanical Property and Engineering Application of Anchor Bolt with Constant Resistance and Large Deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (7): 1297-1308.
- [8] KIMURA F, OKABAYASHI N, KAWAMOTO T. Tunnelling through Squeezing Rock in Two Large Fault Zones of the Enasan Tunnel II [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1987, 20 (3): 151-166.
- [9] AYAYDIN N. First and Second Tube of the Tauern Tunnel [J]. Geomechanics and Tunnelling, 2010, 3 (4): 334-343.
- [10] 胡鹏,宋浪,张红义. 白马隧道软岩大变形机理及长锚杆变形控制效果评价[J]. 现代隧道技术, 2019, 56 (增2): 239-246.
HU Peng, SONG Lang, ZHANG Hong-yi. Large-deformation Mechanism of Soft Rock of Baima Tunnel and Evaluation of Deformation Control Effect of Long Anchor Bolts [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56 (S2): 239-246.
- [11] 李国良,朱永全. 乌鞘岭隧道高地应力软弱围岩大变形控制技术[J]. 铁道工程学报, 2008 (3): 54-59.
LI Guo-liang, ZHU Yong-quan. Control Technology for Large Deformation of Highland Stressed Weak Rock in Wushaoling Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008 (3): 54-59.
- [12] 雷升祥,赵伟. 软岩隧道大变形环向让压支护机制研究[J]. 岩土力学, 2020, 41 (3): 1039-1047.
LEI Sheng-xiang, ZHAO Wei. Study on Mechanism of Circumferential Yielding Support for Soft Rock Tunnel with Large Deformation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41 (3): 1039-1047.
- [13] 何满潮,王博,陶志刚,等. 大变形隧道钢拱架自适应节点轴压性能研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34 (5): 1-10.
HE Man-chao, WANG Bo, TAO Zhi-gang, et al. Axial Compression Behavior of Adaptive Steel Arch Joint for Large-deformation Tunnels [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (5): 1-10.

(下转第121页)

- Large Scale Car-sharing System. Modelling and Evaluation with an Agent-based Approach [J]. Transportation Research Record, 2015, 2009: 1–23.
- [49] CIARI F, BALMER M, AXHAUSEN K W. Estimating the Potential of a Large Scale Car-sharing System with an Agent-based Microsimulation Approach [C] // 12th World Conference on Transport Research (WCTR 2010). Zürich: ETH Zürich, 2010: 1–16.
- [50] CIARI F, SCHUESSLER N, AXHAUSEN K W. Estimation of Carsharing Demand Using an Activity-based Microsimulation Approach: Model Discussion and some Results [J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2013, 7 (1): 70–84.
- [51] CIARI F, BECKER H. How Disruptive Can Shared Mobility Be? A Scenario-based Evaluation of Shared Mobility Systems Implemented at Large Scale [M] // MEYER G, SHAHEEN S. Disrupting Mobility: Impacts of Sharing Economy and Innovative Transportation on Cities, Cham: Springer, 2017: 51–63.
- [52] CIARI F, BALAC M, AXHAUSEN K W. Modeling Carsharing with the Agent-based Simulation MATSim: State of the Art, Applications, and Future Developments [J]. Transportation Research Record, 2016, 2564: 14–20.
- [53] CIARI F, BOCK B, BALMER M. Modeling Station-based and Free-floating Carsharing Demand: Test Case Study for Berlin [J]. Transportation Research Record, 2014, 2416: 37–47.
- [54] GIORGIONE G, CIARI F, VITI F. Availability-based Dynamic Pricing on a Round-trip Carsharing Service: an Explorative Analysis Using Agent-based Simulation [J]. Procedia Computer Science, 2019, 151: 248–255.
- [55] HEILIG M, MALLIG N, SCHRÖDER O, et al. Implementation of Free-floating and Station-based Carsharing in an Agent-based Travel Demand Model [J]. Travel Behaviour and Society, 2018, 12: 151–158.
- [56] KARAMA J, HINDA M, HAYFA Z, et al. Vehicle Sharing Services Optimization Based on Multi-agent Approach [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44 (1): 13040–13045.
- [57] SCHROEDER T, WOLF I. Modeling Multi-level Mechanisms of Environmental Attitudes and Behaviours: The Example of Carsharing in Berlin [J]. Journal of Environmental Psychology, 2017, 52 (10): 136–148.
- [58] BALAC M, CIARI F, AXHAUSEN K W. Modeling the Impact of Parking Price Policy on Free-floating Carsharing: Case Study for Zurich, Switzerland [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 77 (4): 207–225.
- [59] LAARABI H, BOLDRINI C, BRUNO R, et al. Integration of Demand and Operational Models for an Agent-based Model of a Stackable Electric Vehicle [C] // Proceedings of the 6th Symposium of the European Association for Research in Transportation. Haifa, Israel: European Association for Research in Transportation, 2017.

(上接第99页)

- [14] 伍毅敏, 吕康成. 隧道大变形灾害施工监控技术研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18 (1): 133–137.
- WU Yi-min, LÜ Kang-cheng. Study on Monitoring Techniques for Large Deformation Hazard in Tunnel [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18 (1): 133–137.
- [15] 王英帆, 刘钦, 胡永志, 等. 高地应力软岩隧道大变形监测及支护优化 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (30): 317–323.
- WANG Ying-fan, LIU Qin, HU Yong-zhi, et al. Large Deformation Monitoring and Support Optimization of Soft Rock Tunnel with High Ground Stress [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19 (30): 317–323.
- [16] 郭健, 阳军生, 陈维, 等. 基于现场实测的炭质板岩隧道围岩大变形与衬砌受力特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (4): 832–841.
- GUO Jian, YANG Jun-sheng, CHEN Wei, et al. Research on Large Deformation of Surrounding Rock and Mechanical Characteristics of Lining of Carbonaceous Slate Tunnel Based on Field Measurement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (4): 832–841.
- [17] 李磊, 谭忠盛. 挤压性破碎软岩隧道大变形特征及机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37 (增1): 3593–3603.
- LI Lei, TAN Zhong-sheng. Characteristic and Mechanism Research for Large Deformation Problem in Squeezing-shattered Soft Rock Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (S1): 3593–3603.
- [18] JTG/T 3660—2020, 公路隧道施工技术规范 [S].
- JTG/T 3660—2020, Technical Specification for Construction of Highway Tunnel [S].