

文章编号: 1674—8247(2021)06—0037—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.06.008

## 云南地区铁路隧道地质勘察技术探讨

陈 伟<sup>1</sup> 杜宇本<sup>2</sup> 蒋良文<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**本文通过对云南地区在建和已建成的 10 条铁路隧道施工后围岩级别的统计分析,总结了云南地区铁路隧道围岩的分布特征:施工后,隧道围岩级别占比中Ⅳ、Ⅴ级围岩比例高,Ⅳ、Ⅴ级围岩比例与软质岩占比之间接近正比关系;以小江断裂~弥勒-师宗断裂一带为界的東西方向及三江并流区域向南东的横断山区南延段的南北地理方向上,围岩级别比例受地质构造影响严重程度不均,隧道围岩级别的占比与区域断裂走向密切相关。并对云南地区铁路隧道地质勘察周期、隧道围岩与工程投资的相互关系、隧道围岩的修正、隧道物探正常场的钻探验证、围岩初始地应力的评价与大变形的确定等进行了技术探讨,以期为该地区后续铁路项目的隧道建设提供参考。

**关键词:**云南地区; 铁路隧道; 地质勘察; 围岩; 物探; 大变形

**中图分类号:**U452.1 **文献标志码:**A

## On Geological Investigation Technology for Railway Tunnel in Yunnan

CHEN Wei<sup>1</sup> DU Yuben<sup>2</sup> JIANG Liangwen<sup>2</sup>

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Based on the statistical analysis of the surrounding rock grades of 10 railway tunnels under construction and completed in Yunnan, this paper summarizes the distribution characteristics of the surrounding rock of railway tunnels in Yunnan: After the construction, there is a high proportion of tunnel surrounding rock of Grade Ⅳ and Ⅴ, which is nearly proportional to the proportion of soft rock. In the east-west direction bounded by Xiaojiang Fault-Mile-Shizong Fault and in the south-north geographical direction from the Three Parallel Rivers of Yunnan Protected Areas to the south extension of Hengduan Mountains in the southeast, the degree of influence of geological structure on the surrounding rock grade ratio is uneven. The proportion of tunnel surrounding rock grades is closely related to the regional fault strike. The paper also made technical discussion on the geological investigation period of railway tunnels in Yunnan, the relationship between tunnel surrounding rock and project investment, the correction of tunnel surrounding rock, the drilling verification of normal fields of tunnel geophysical exploration, the evaluation of initial in-situ stress of surrounding rock, and the determination of large deformation, so as to provide a reference for tunnel construction of subsequent railway projects in this area.

**Key words:** Yunnan region; railway tunnel; geological investigation; surrounding rock; geophysical exploration; large deformation

收稿日期:2020-09-30

作者简介:陈伟(1981-),男,高级工程师。

引文格式:陈伟,杜宇本,蒋良文. 云南地区铁路隧道地质勘察技术探讨[J]. 高速铁路技术,2021,12(6):37-41.

CHEN Wei, DU Yuben, JIANG Liangwen. On Geological Investigation Technology for Railway Tunnel in Yunnan [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(6):37-41.

云南地区地形地貌经历多期构造运动,地势西北高、东南低,由北向南呈阶梯状下降。由于地处环太平洋构造区域特提斯-喜马拉雅构造区的复合部位,跨越欧亚、印度两大板块碰撞地段及其影响带,地质构造极其复杂,断裂构造极为发育<sup>[1]</sup>。断裂活动、差异抬升及河流下切作用,造就了该地区复杂多层次的以山地和高原为主的切割地势,普遍呈现岩体松散、软弱、软硬相间的工程特征,不良地质及特殊岩土发育,工程地质条件极为复杂。

近年来,云南地区开工建设及已建成的主要铁路干线隧道工程在地质勘察过程中均采用遥感解译、地质测绘、综合物探、钻探、原位测试、水文地质试验、地应力测试、室内试验及专题研究相结合的综合地质勘察方法开展工作,执行可研、初步设计、施工图设计审批意见和工程地质勘察大纲,符合相关铁路工程地质勘察规范、规程的要求。本文对云南地区近年来在建、已建成主要铁路干线隧道地质勘察工作进行技术探讨,以期为该地区后续铁路项目的隧道建设提供参考。

1 铁路隧道围岩分布特征

1.1 隧道围岩划分标准

铁路隧道按照《铁路隧道设计规范》及《铁路工程地质勘察规范》相关规定综合评价隧道围岩分级。主要根据围岩的岩体或土体特征、岩石的坚硬程度、岩体的完整程度、风化程度等地质条件,综合考虑地下水与高地应力的影响、隧道地面物探解译及测井纵波测试成果、隧道埋藏深度等因素。

1.2 隧道围岩统计

收集近年来云南地区开工建设及已建成通车的10条主要铁路干线,分布如图1所示。隧道施工后各级围岩比例如表1所示。

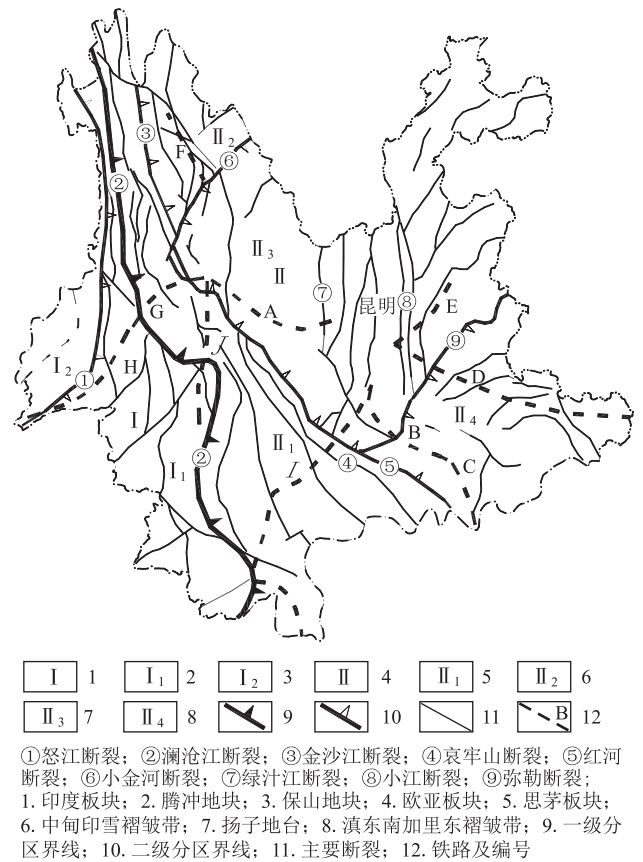


图1 近年来云南地区已建成(含在建)的主要铁路干线分布示意图

表1 近年来云南地区主要铁路干线隧道施工后围岩级别比例一览表

项目	Ⅱ /%	Ⅲ /%	Ⅳ /%	Ⅴ /%	Ⅵ /%	合计 /%	隧道围岩情况
A线全长110 km,隧道占比67%,2018年7月通车	-	3.3	43.5	53.2	-	100	以软质岩为主
B线全长150 km,隧道占比40%,2013年2月通车	1.3	11.8	25.5	60.1	1.3	100	硬质岩约占81.6%,软质岩占18.4%
C线全长141 km,隧道占比69%,2014年12月通车	3.7	31.4	33.4	31.5	-	100	硬质岩约占58.2%,软质岩占41.8%
D线云南段全长434 km,隧道占67%,2016年12月通车	2.6	30	40.6	26.8	-	100	硬质岩占42%,软质岩占58%
E线全长142 km,隧道占比10%,2007年4月通车	-	9.8	31.6	58.6	-	100	硬质岩占18.5%,软质岩占81.5%
F线全长140 km,隧道占比66%,2014年10月开工,在建	1.1	16.7	24.8	57.4	-	100	硬质岩约占65%,软质岩约占35%
G线全长134 km,隧道占比78%,2008年6月开工,在建	5.6	4.8	27.5	62.2	-	100	硬质岩占39.8%,软质岩占60.2%
H线全长196 km,隧道占比58%,2014年12月开工,在建	3.1	20.5	35.8	40.6	-	100	硬质岩占61.45%,软质岩占38.55%
I线全长508 km,隧道占比78%,2015年12月开工,在建	2.0	8.8	48.5	40.7	-	100	硬质岩占13.2%,软质岩占86.8%
J线全长202 km,隧道占比77%,2015年12月开工,在建	-	9	30.3	60.7	-	100	硬质岩约占20%,软质岩约80%

注:1. 在建铁路项目隧道围岩统计至2019年;2. 隧道围岩中,硬质岩单轴饱和抗压强度  $R_c > 30$  MPa,软质岩  $R_c \leq 30$  MPa

1.3 隧道围岩分布特征

分析10条铁路隧道的围岩统计数据,得出云南地区隧道围岩具有以下特征:

(1) 云南地区铁路隧道围岩中,软质岩比例在35%~86.8%,施工后Ⅳ、Ⅴ级围岩占比多在65%以上。铁路隧道施工后Ⅳ、Ⅴ级围岩比例与软质岩占比

间接近正比关系。软质岩占40%左右的铁路,施工后Ⅳ、Ⅴ级约占60%~80%(如C线、H线);软质岩占60%左右的铁路,施工后Ⅳ、Ⅴ级可达到70%~90%(如G线、D线);软质岩占80~90%的铁路,施工后Ⅳ、Ⅴ级约占90%(如I线、A线、J线);若主要以软质岩为主,则Ⅳ、Ⅴ级围岩比例可达95%以上(如A线)。

(2)西南地区以北北东~南北向的龙门山断裂系-康滇断裂系为界,东西两大地域受地质构造影响差别显著。两大断裂系以西地区,山川叠嶂,地势巍峨,深大活动断裂广泛分布,分支断裂及褶皱密集发育,地震活动频繁,隧道围岩受构造影响极其显著;以东地区地形起伏舒缓,构造影响相对降低。

云南地区以南北向小江断裂~北东向弥勒-师宗断裂一带为界,以西地区隧道围岩受构造影响程度显著,较断裂以东地带严重,如D线与C线,隧道硬质岩占比42%~58%,软质岩占比58%~42%。以东地区施工后隧道Ⅱ、Ⅲ级围岩占比可高达32.6~35.1%,普遍较两大断裂以西其它铁路线高,Ⅴ级围岩占比26.8%~31.5%,明显较两大断裂以西地区铁路线低。

云南境内自北西的三江并流区域向南东的横断山区南延段、青藏歹字型构造云南段(即思茅地块及其附近)自北西向南东,隧道围岩受构造影响程度逐次降低。如F线、G线、J线,施工后Ⅴ级占比多在60%左右,向南东I线施工后Ⅴ级占比约40%左右。

(3)线路走向与区域主干断裂构造线走向近平行或小角度相交的铁路,隧道Ⅴ级围岩占比多在50%~60%,如J线、A线、B线、F线、E线等。

## 2 技术经验探讨

### 2.1 勘察周期的确定

地形地质条件复杂、交通困难地区,山高坡陡,机具搬运困难,区域地质资料薄弱,地质勘察难度大。铁路长大隧道定测地质勘察流程如图2所示。I线13座长度大于10 km 特长隧道的实际勘察情况为:定测地质测绘及稳定线路方案用时约4个月;物探用时约3.3~10.2个月,平均6.1个月;深孔钻探完成80%用时1.4~14.2个月,平均6.5个月;深孔钻探完成100%用时3.1~19.3个月,平均10.7个月;测试及资料综合分析整理约1个月。若按深孔完成80%计算,隧道勘察周期累计需要11.3~25.1个月,平均17.2个月;若按深孔完成100%计算,隧道勘察周期累计需要13.7~30.2个月,平均21.4个月(进出口、浅埋钻探用时较少,不参与分析),如图3所示。从图3

可以看出,长大隧道地质勘察用时主要受深孔勘探影响。因此,南北向小江断裂~北东向弥勒-师宗断裂以西地区,地质条件极为复杂,深孔数量多、实施难度大、耗时长的隧道,勘察周期普遍偏大。

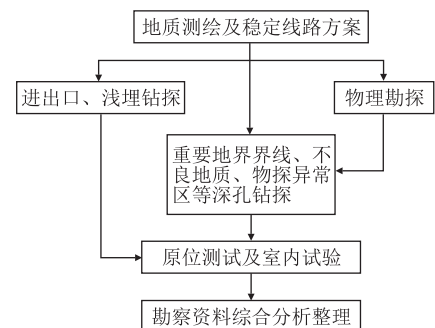


图2 长大隧道定测地质勘察流程图

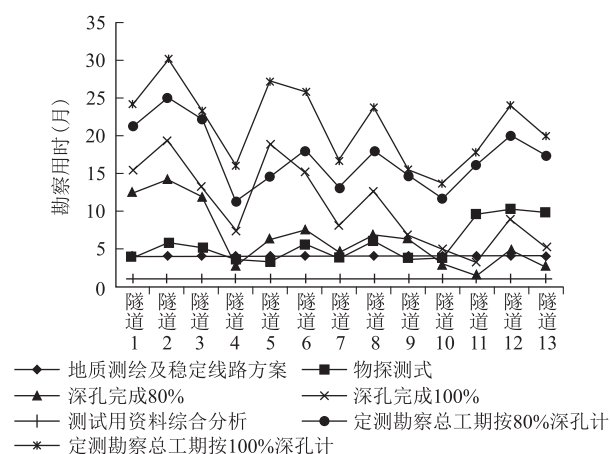


图3 13座特长隧道定测地质勘察用时图

根据I线13座特长隧道勘察用时的分析结果,按深孔完成80%以上计算长大隧道定测勘察的合理工期为17~21个月(不含设计时间),地质条件复杂的应考虑适当延长。

### 2.2 工程投资的确定

勘察设计各阶段,特别是前期工程预概算总额对隧道围岩分级有重大影响。

滇西地区的铁路项目,隧道占线路长度多在60%以上,主要以长大隧道为主,隧道所占投资总额高,控制隧道投资即可控制项目投资。在勘察前期阶段,地质工作深细度较浅,隧道围岩分级中,经验成分较多,现场依据较少;定性判断较多,定量判断较少;受主观控制因素多,考虑客观因素少。因此,隧道围岩分级易受人为影响。为贯彻控制投资的总体思路和要求,个别项目通过调整隧道围岩分级即可轻易达到控制投资目的,隧道围岩分级预测偏高,导致施工后围岩分级变更,增加工程投资,如表2所示。



表2 个别项目隧道围岩增加投资一览表

项目	初设投资 /亿元	围岩增加投资 /亿元	增幅 /%
I线	505	34	6.7
J线	150	10	6.7
H线+G线	235	10	4.3
F线	103	11	10.7

云南山区铁路隧道占比高,长大隧道地质条件复杂,其工程总投资较平原地区铁路大,工程前期应充分考虑其工程复杂程度、地质条件复杂程度等客观因素对数据该地区铁路工程预概算的影响,如隧道围岩的较岩占比、区域受地质构造的影响程度、线路与区域主干地质构造线的走向关系等。根据已收集的云南地区铁路隧道围岩资料:隧道围岩中软质岩占比高的地段Ⅳ、Ⅴ级围岩比例高;断裂密集切割、褶皱遍布区Ⅴ级围岩占比高;线路与区域主干地质构造线走向近平行或小角度相交的Ⅴ级占比高。

2.3 地下水、地应力、主要结构面状态对围岩的修正

西南地区地质条件复杂,长大隧道众多,埋深大,在勘察期间进行准确的围岩分级难度大。现行《铁路工程地质勘察规范》对勘察期间围岩分级的相关规定存在不足。首先,勘察阶段无法准确判断地下水的出水状态,预计洞内是潮湿、淋雨状、线流状、还是涌流状出露;其次,勘察阶段无法准确预测开挖后的裂缝情况、成洞条件、位移特征等,评价隧道各个段落的地应力状态;最后,对于深埋、复杂隧道,其围岩节理、裂隙与岩体产状等主要结构面的不利组合状态,更是难以通过地表调绘、物探、深孔钻探等查明。

因此,对于长大、深埋隧道,勘察期间划分围岩基本分级后,考虑地下水、地应力、主要结构面组合状态等因素对围岩进行精准修正存在困难。对于隧道围岩受地下水、地应力、主要结构面状态等因素的影响程度,根据施工开挖揭示的具体情况进行实事求是地按规范修正更符合客观实际。

目前,国内外的围岩分级方法,或是定性或是定量,或是定性与定量相结合,且多以前两种方法为主。如水力水电<sup>[2]</sup>、铁路围岩分级以定性为主,公路<sup>[3]</sup>、地铁<sup>[4]</sup>以定量为主。定性与定量的围岩分级均存在一些不足,需对围岩分级标准、规范进行修订完善,同时应积极探索长大、深埋隧道围岩分级的新理论、新技术。

2.4 物探正常场的钻探验证

滇西、滇南地区板块运动剧烈,区内广泛分布各期岩浆岩,以花岗岩、辉绿岩、玄武岩为主,部分为闪长岩、辉长岩、超基性岩等,发育有岩基、岩床、岩墙、岩株

状等形态。具多期旋回活动的特点,经历了吕梁、晋宁、澄江、华力西、印支、燕山、喜山7个期次<sup>[5]</sup>,蚀变严重,蚀变带分布规律性差,厚度不均,蚀变类型复杂,具有碎裂化、片理化特征,岩体强度及完整性差异大,局部富水,隧道围岩以Ⅳ、Ⅴ级为主。

现行《铁路工程地质勘察规范》4.3.5条规定:“地质复杂,长度大于1 000 m的隧道,……重要物探异常点应有钻探验证”。目前铁路长大隧道地质勘察过程中,多对涉及工程施工安全的物探低阻异常点、解译构造破碎带等极破碎、极软弱或富水岩体地段进行钻探验证,对岩浆岩物探正常场部分验证不充分,导致部分隧道围岩由Ⅱ、Ⅲ级变更为Ⅳ、Ⅴ级的情况较多。如I线某特长隧道花岗岩段,勘察期间在DK 31+700~DK 33+600段洞身地表进行可控源音频大地电磁法(CSAMT)物理勘探后,结合地质调绘在DK 31+800物探Ⅴ类异常区和DK 33+500的不整合界线布置深孔钻探,按规范未对DK 32+200~DK 33+400段物探Ⅱ、Ⅲ类正常场钻探验证,设计围岩主要为Ⅱ级,部分为Ⅲ级。施工后揭示该段围岩蚀变带发育,蚀变厚度从0.6 m至十余米,分布、走向无规律,与隧道走向构成复杂的空间关系。蚀变带岩体多呈坚硬砂土状,易崩解,强度低,现场取样试验点荷载换算天然抗压强度6.28~17 MPa,为软岩,开挖后围岩级别变更为Ⅳ、Ⅴ级为主。地质纵断面示意如图4所示。

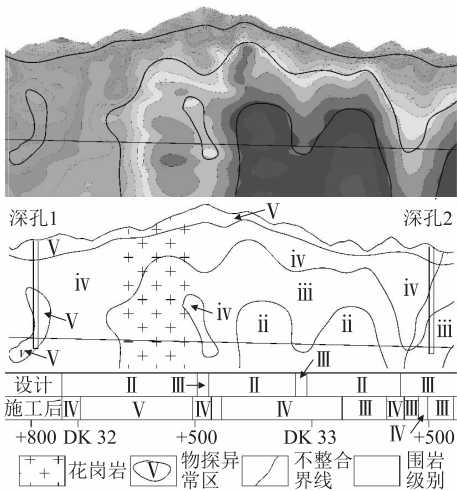


图4 某隧道花岗岩段地质纵断面示意图

通过分析,造成变更的主要原因是云南地区岩浆岩蚀变规律性差,厚度变化大,地表调绘难以反映洞身特征,蚀变带物性差异及规模未在物探资料中明显反映出来。因此,隧道地质勘察期间应同时对岩浆岩地区物探正常场进行钻探验证。

2.5 隧道围岩大变形

滇西南山区新构造运动强烈,构造应力复杂,大变

形成因机理及类型众多,新建工程应进行专项地质勘察和设计,预留相关工程费用。

(1)目前,《铁路隧道设计规范》采用岩石单轴饱和抗压强度 $R_c$ 与垂直洞轴线方向的最大初始地应力值 $\sigma_{\max}$ 的比值 $R_c/\sigma_{\max}$ 来判别地应力状态, $R_c/\sigma_{\max}=4\sim7$ 为高地应力, $R_c/\sigma_{\max}<4$ 为极高地应力。但高地应力大变形段围岩往往干燥或少量渗水,远达不到饱和状态。此外,对隧道结构造成影响的是岩体的强度而非岩石强度,采用岩石强度指标无法完全准确反映岩体的强度。因此,应采用岩体的天然抗压强度评价围岩初始地应力状态。

(2)根据隧道施工经验,软岩大变形的程度不仅与地质条件有关,还与施工工法、工艺等密切相关<sup>[6]</sup>。根据施工阶段隧道大变形特征,再布置试验段确定工程措施才切合实际。国内多座隧道大变形的支护参数都是通过试验段确定的,如兰渝铁路木寨岭隧道<sup>[7]</sup>、十房高速公路通省隧道<sup>[8]</sup>、中老铁路会富莱隧道<sup>[9]</sup>等。实践表明,在勘察设计阶段就明确划分大变形的等级与长度,并设计具体处理措施,是不科学的,不但易造成工程浪费,也不能保证施工安全和工程质量。本文统计了云南地区部分铁路项目原设计与施工期间实际发生的隧道大变形等级与长度,如表3所示。

表3 部分项目隧道大变形对比一览表

项目	阶段	I 轻微	II 中等	III 强烈	总和
I 线	原设计/km	33.0	0	0	33.0
	实际发生/km	8.7	0.4	0	9.1
	占比/%	26	1	0	28
J 线	原设计/km	6.5	0	0	6.5
	实际发生/km	6.3	4.4	0	10.7
	占比/%	97	68	0	165
H 线 + G 线	原设计/km	29.2	2.5	0	31.7
	实际发生/km	4.9	1.0	0.7	6.6
	占比/%	15	3	2	21
F 线	原设计/km	4.21	0	0	4.2
	实际发生/km	3.6	13.8	0.1	17.5
	占比/%	85	329	2	416

注:占比=实际发生/原设计总和×100%

可见各项目原设计大变形等级和长度与实际发生情况均存在较大差异。因此,勘察设计阶段的重点工作是判定大变形的存在,并预留工作量及费用,施工阶段通过试验段确定大变形的处理措施。

3 结束语

云南地区地形地质条件复杂,隧道比重大,长隧多,埋深大。施工后,隧道围岩级别占比中IV、V级围岩比例高,IV、V级围岩比例与软质岩占比之间接近正比关系。以小江断裂~弥勒-师宗断裂一带为界的东

西方向及三江并流区域向南东横断山区南延段的南北方向上,围岩级别比例受地质构造影响严重程度不均,隧道围岩级别的占比与区域断裂走向密切相关。铁路工程总投资需考虑软质岩比例、受构造影响程度、与主干断裂关系等;施工阶段应根据开挖实际情况考虑地下水、地应力、主要结构面组合状态等因素对围岩级别进行修正,勘察阶段应加强物探正常场的钻探验证工作。应采用岩体的天然抗压强度评价围岩初始地应力状态,勘察设计阶段重点应判定大变形的存在,预留工作量及费用,施工阶段通过试验段确定大变形的处理措施。

参考文献:

[1] 卿三惠. 西南铁路工程地质特征及成就[J]. 铁道工程学报, 2005, 22(S1): 123-139.  
QING Sanhui. Engineering Geological Characteristics and Achievements of Railways in Southwest Zone[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 22(S1): 123-139.

[2] GB 50487-2008 水利水电工程地质勘察规范[S].  
GB 50487-2008 Code for Engineering Geological Investigation of Water Resources and Hydropower[S].

[3] JTG C20-2011 公路工程地质勘察规范[S].  
JTG C20-2011 Code for Highway Engineering Geological Investigation[S].

[4] GB 50307-2012 城市轨道交通岩土工程勘察规范[S].  
GB 50307-2012 Code for Geotechnical Investigations of Urban Rail Transit[S].

[5] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1990.  
Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geological Record of Yunnan Province[M]. Peking: Geological Press, 1990.

[6] 朱永全, 孙明磊, 李文江. 高地应力软岩大变形隧道稳定性判据研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 54-58.  
ZHU Yongquan, SUN Minglei, LI Wenjiang. Research on Stability Criterion of Tunnel with Large Deformation in High Ground Stress Weak Rock[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 54-58.

[7] 李锋, 王广宏, 刘虹. 木寨岭隧道7号斜井大变形影响因素分析[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(2): 33-36.  
LI Feng, WANG Guanghong, LIU Hong. Analysis on Factors Affecting the Deformations of No. 7 Inclined Shaft in Muzhailing Tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2011, 48(2): 33-36.

[8] 沈峰, 成词峰, 周俊书. 通省特长隧道软岩大变形机理及处治措施[J], 公路, 2012(1): 208-211.  
SHEN Feng, CHENG Cifeng, ZHOU Junshu. Mechanism and Treatment Measures for Large Deformation of Soft Rock in the Extra-long Tunnel Tongsheng Tunnel[J], Highway, 2012(1): 208-211.

[9] 余小周. 中老铁路会富莱隧道软岩大变形控制技术研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 12-17.  
YU Xiaozhou. Study on Control Technique for Large Deformation of Soft Rocks in Huifulai Tunnel of China-Laos Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 12-17.