

引黄济宁工程隧洞古近系软岩物理力学特征研究

杨继华, 郭卫新, 万伟锋, 刘振红, 姚 阳

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:青海省引黄济宁工程隧洞古近系地层分布范围广,隧洞埋深大,研究古近系地层的物理力学特征进而评价隧洞围岩的变形与稳定,对于隧洞设计与施工具有重要意义。针对隧洞古近系地层围岩稳定性问题,采用试验及经验分析的方法进行了古近系地层软岩物理力学特征研究。结果表明:古近系地层岩石密度较低,吸水率较高;饱和状态下岩石单轴抗压强度急剧降低,软化系数极低;部分岩性具有膨胀性;少量岩性耐崩解性较差。引黄济宁工程隧洞古近系地层岩石在富水条件下力学性能差,对围岩稳定不利,当埋深 >127 m时,围岩可能产生严重—极严重挤压变形,施工中应根据围岩变形特征,有针对性地采取工程措施,以减少围岩变形的危害。

关键词:引水隧洞;古近系地层;物理力学特征;强度应力比;挤压变形;引黄济宁工程

中图分类号:P634.1;TV554 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)03-0047-08

Study on the physical mechanics characteristics of the paleogene soft rock in the tunnel of Yellow River to Xining water diversion project

YANG Jihua, GUO Weixin, WAN Weifeng, LIU Zhenhong, YAO Yang

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450003, China)

Abstract: The Paleogene strata is widely distributed in the tunnel of the Yellow River to Xining water diversion project in Qinghai Province, and the tunnel burial depth is deep. It is of great significance for tunnel design and construction to evaluate the deformation and stability of tunnel surrounding rock based on the study the physical mechanical characteristics of the Paleogene strata. In view of the stability of the surrounding rocks in Paleogene strata, A preliminary study on the physical mechanics of soft rock was conducted using experimental and empirical analysis methods. The results showed that the Paleogene strata has low density and high water absorption rate. Under saturated conditions, the uniaxial compressive strength of rocks decreases sharply, and the softening coefficient is extremely low; Some types of rock have expansibility and a small amount of rock has poor resistance to disintegration; The mechanical properties of the rock are poor under water-rich conditions, which is detrimental to the stability of the surrounding rocks. When the burial depth is over 127m, the surrounding rocks may undergo severe to extremely severe compression deformation. During the construction, targeted engineering measures should be taken based on the deformation characteristics of the surrounding rocks to reduce the hazard of surrounding rock deformation.

Key words: water diversion tunnel; Paleogene strata; physical mechanical properties; strength-stress ratio; compressional deformation; Yellow River to Xining water diversion project

0 引言

我国水资源时空分布不均,为解决部分地区工

业、农业及城镇生活用水等的短缺问题,国家和地方兴建了大批的引调水工程,如滇中引水工程^[1]、北

收稿日期:2024-09-27; 修回日期:2024-12-19 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.03.006

基金项目:黄河勘测规划设计研究院有限公司自主研究开发项目“深埋长隧洞第三系软岩变形特征及控制技术研究”(编号:2022KY003)、“引黄济宁工程深埋超长隧洞施工工期超前地质预报关键技术研究及应用”(编号:2023KY014)

第一作者:杨继华,男,汉族,1980年生,正高级工程师,岩土工程专业,博士,主要从事隧洞与地下工程勘察、设计及研究工作,河南省郑州市金水区金水路109号,yangjihua68@sohu.com。

引用格式:杨继华,郭卫新,万伟锋,等.引黄济宁工程隧洞古近系软岩物理力学特征研究[J].钻探工程,2025,52(3):47-54.

YANG Jihua, GUO Weixin, WAN Weifeng, et al. Study on the physical mechanics characteristics of the paleogene soft rock in the tunnel of Yellow River to Xining water diversion project[J]. Drilling Engineering, 2025,52(3):47-54.

疆供水工程^[2]、引江补汉工程^[3]、引汉济渭工程^[4]、引大济岷^[5]等,这些引调水工程在工程布置时,由于地形条件限制,布置有大量的长隧洞工程。

古近系地层在我国分布广泛,其以陆相沉积为主,沉积类型复杂^[6]。岩性以泥岩、砂岩、砂砾岩为主,具有强度低、胶结性差、水理性差的特点。在古近系地层进行隧洞开挖时,易出现围岩大变形、涌水突泥、支护衬砌破坏等不良地质现象,严重时可能造成人员伤亡、设备损毁、工期延误、投资增加等后果^[7-11]。

针对古近系地层的隧洞开挖中的工程地质问题,工程技术人员开展了相关的研究。吕龙龙等^[12]依托胡麻岭隧道工程,对古近系红层软岩进行了侧限及三轴压缩试验,建立了屈服面模型,为隧道开挖后古近系围岩的变形与稳定评价提供了依据;朱举^[13]以某隧道穿越古近系砂砾岩为背景,进行了岩体大型剪切试验,分析了水对砂砾岩力学特性的影响,结果表明,水会显著降低砂质砾岩的抗剪强度,其强度参数随着水的浸润时间的延长而下降;张献伟等^[14]以浩吉铁路中条山隧道为例,针对隧道仰拱部位地下水聚集造成古近系泥岩强度降低问题,提出了地下水分类归集、基底回填碎石加固、后期注浆加固的处理技术,解决了隧道仰拱基底病害问题;于洪洋^[15]采用室内试验的方法,获取了古近系半成

岩砂砾岩的物理力学参数,然后采用数值模拟的方法分析了地下水渗流作用下隧道掌子面的稳定性,并提出了掌子面稳定性判据;孙刚等^[16]通过水平钻探取心的节理裂隙,建立岩体标准模型,计算隧道围岩的岩体完整性系数,精细划分隧道围岩类别。

但不同地区的古近系地层性质有所差别,隧洞开挖所出现的不良地质现象也有所不同,因此不同隧洞工程需要根据地质情况开展具体的研究工作。本研究以青海省引黄济宁工程引水线路、供水线路的隧洞穿越古近系软岩地层为背景,采用室内试验的方法,获取古近系软岩的物理力学参数,并采取经验分析法,进行隧洞围岩稳定性初步评价,为隧洞的支护、衬砌设计等提供参考。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

青海省引黄济宁工程从黄河干流龙羊峡水库引水,向西宁市、海东市城镇生活、工业及农业灌溉供水,并为改善区域生态环境创造条件。引黄济宁工程可分为引水工程和供水工程两大部分。其中引水工程为一条长度为74.40 km的隧洞,隧洞最大埋深1410 m。供水工程由供水干线、供水支线、供水支管等组成,供水工程干线长137.04 km,其中隧洞21座,长115.80 km^[17]。引黄济宁工程引水工程及供水工程线路布置见图1所示。



图1 引黄济宁工程引水工程及供水工程线路布置示意

Fig.1 Schematic diagram of the route layout for the Yellow River to Xining water diversion project

1.2 地质条件

引黄济宁工程引水工程隧洞末端和供水工程隧洞均穿越西宁盆地,西宁盆地位于青藏高原东北缘,在地质构造上受拉脊山断裂和祁连山断裂控制。西宁盆地古近系湖相沉积物位于白垩系河口群之上,为整合接触。工程区涉及的古近系地层主

要为古近系西宁群(E_x)和新近系咸水河群(N_1x),主要岩性如下:

古近系西宁群(E_x):岩性为砖红、暗红色砂岩、泥岩、砂砾岩、粉砂岩、砾砂岩等,广泛出露于湟水盆地周边中低山丘陵区。厚度一般100~300 m,在日月藏族自治县引水隧洞穿越的药水河谷地厚度

达1000 m。

新近系咸水河群(N_{1x}):岩性为浅红、浅黄色泥岩夹青灰、浅黄色砾岩、砂砾岩、石膏等,分布在西宁盆地边缘。厚度一般50~300 m。

引黄济宁工程拉脊山边缘地表出露的古近系地层见图2,工程隧洞末端新近系地层钻孔岩心见图3。



图2 地表出露的古近系地层

Fig.2 Paleogene strata exposed on the surface

引黄济宁工程引水工程和供水工程隧洞部分洞段位于古近系和新近系地层内,参考类似工程经验,此类地层岩石胶结性差、强度低、水理性差,存在围岩稳定问题^[18],需要开展古近系地层围岩的物理力学特征及稳定性研究,为隧洞的围岩稳定性评价及开挖支护衬砌等提供参考。

2 围岩特征

2.1 物理力学特征

在引黄济宁工程隧洞的勘察过程中,采取原状钻孔岩心样共89组,取样位置主要在隧洞桩号36+200的SZK14钻孔、桩号38+100的SCZK06钻孔、桩号67+850的SZK24钻孔、桩号71+900的SCZK14钻孔等,岩性包括了新近系的砂质泥岩,古近系的砂砾岩、泥质砂岩、泥岩、含砾砂岩等,基本上涵盖了引黄济宁工程隧洞古近系的全部岩性,部分岩样照片如图4所示。按照水利水电工程岩石试



(a)隧洞桩号71+900处SCZK14钻孔(144~150m岩心)



(b)隧洞桩号38+100处SCZK06钻孔(553~560m岩心)

图3 引水隧洞古近系地层钻孔岩心

Fig.3 Core of Paleogene strata from the tunnel

验规程(SL/T 264—2020)^[19]的方法进行物理力学试验,主要包括:块体密度试验,单轴抗压强度试验,抗拉强度试验。



图4 物理力学特征试验岩样

Fig.4 Rock samples for physical mechanical characteristic test

试验结果统计见表1所示。

由表1可知,新近系的砂质泥岩干燥状态下平均块体密度为2.18 g/cm³,饱和状态下为2.50 g/cm³,古近系的砂砾岩、泥质砂岩、泥岩、含砾砂岩等

表1 古近系地层物理力学特征试验统计
Table 1 Test statistics of physical mechanical characteristics of the Paleogene strata

岩性	地质年代	统计类别	块体密度/(g·cm ⁻³)			抗拉强度/MPa		单轴抗压强度/MPa			
			自然	干	饱和	自然	自然	干	饱和	软化系数	
砂质泥岩	新近系	组数	6	2	6	5		2	6		
		最大值	2.33	2.23	2.59	1.13		16.20	1.19		
		最小值	2.15	2.14	2.40	0.62		14.45	0.08		
		平均值	2.25	2.18	2.50	0.82		15.33	0.31	0.020	
砂砾岩	古近系	组数	34	29	16	16	24	30	21		
		最大值	2.53	2.49	2.58	1.52	6.85	12.20	1.94		
		最小值	2.05	1.87	2.30	0.04	0.61	1.64	0.09		
		平均值	2.32	2.21	2.40	0.38	2.12	6.67	0.48	0.072	
泥质砂岩	古近系	组数	5	4	3	4	2	4	5		
		最大值	2.31	2.14	2.34	0.61	1.64	10.70	0.76		
		最小值	2.06	1.91	2.10	0.13	0.98	3.56	0.06		
		平均值	2.19	2.02	2.26	0.28	1.31	6.45	0.35	0.054	
泥岩	古近系	组数	28	15	9	20	3	15	26		
		最大值	2.49	2.38	2.47	0.99	5.02	27.00	6.08		
		最小值	2.10	1.80	2.14	0.02	0.51	1.68	0.07		
		平均值	2.29	2.08	2.32	0.40	2.36	13.90	1.35	0.097	
含砾砂岩	古近系	组数	16	12	16	7	7	12	16		
		最大值	2.34	2.23	2.49	0.66	2.32	8.20	0.96		
		最小值	2.26	2.09	2.30	0.14	0.99	4.19	0.13		
		平均值	2.31	2.18	2.38	0.33	1.60	5.99	0.51	0.085	

干燥状态下平均块体密度为2.02~2.21 g/cm³,饱和状态下为2.26~2.40 g/cm³。从而看出,古近系地层的岩体干燥状态和饱和状态下密度差异较大,说明岩体胶结性较差,内部有较大的孔隙,吸水率较高。

岩石单轴抗压强度方面,干燥状态下古近系地层岩石单轴抗压强度5.99~15.33 MPa,而饱和状态下单轴抗压强度0.31~1.35 MPa,可以看出,古近系

地层岩石饱水后强度急剧降低,岩石的软化系数为0.020~0.097,属于极易软化岩石。

2.2 岩石膨胀性

2.2.1 X射线测试

对沿线古近系砂质泥岩和泥质砂岩取岩样6组,碾成粉末后用X射线测试进行黏土矿物成份鉴定,鉴定结果见表2所示。

表2 泥岩(砂岩)X射线粉晶衍射法矿物成份鉴定成果

Table 2 Mineral composition identification results of mudstone (sandstone) by X-ray powder diffraction method

野外编号	制样编号	岩性	测试结果/%								
			蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石
NZK92-1	9	泥岩	—	8	37	—	45	5	—	5	—
NZK31-1	18	泥岩	—	40	—	16	26	1	5	12	—
NZK31-2	19	泥岩	—	15	—	12	46	2	4	21	—
NZK15-1	15	砂岩	5	9	—	6	48	13	2	15	2
NZK15-2	16	砂岩	—	5	—	5	76	5	4	3	2
NZK15-3	17	砂岩	5	9	11	—	50	13	2	9	1

鉴定结果表明:古近系泥岩黏土矿物含量占总矿物含量的27%~45%,石英含量占总矿物含量的26%~45%;砂岩黏土矿物含量占总矿物含量的10%~30%,石英含量占总矿物含量的48%~76%。

当蒙脱石含量达到6%或伊利石(水云母)含量达到15%以上(包括两者之和占15%),即可判定该试样具有膨胀性^[20]。从矿物成分试验结果看,沿线砂质泥岩和泥质砂岩中蒙脱石、伊利石、高岭土等亲水性矿物不占主导地位。其中泥质砂岩蒙脱石含量均<6%,蒙脱石和伊利石均<15%,初步判定古近系泥质砂岩不具有膨胀性;古近系砂质泥岩蒙脱石含量均<6%,但蒙脱石和伊利石多>15%,初步判定古近系砂质泥岩具有膨胀性。

2.2.2 岩石膨胀试验

对隧洞沿线的古近系泥岩、砂质泥岩及含砾砂岩分别取岩样21组、9组和2组进行自由膨胀率试验、侧向约束轴向膨胀率和膨胀力试验,岩石样品见图5,试验数据见表3。

从自由膨胀率试验数据看,沿线分布的古近系泥岩、砂质泥岩均为非膨胀岩—弱膨胀岩;古近系



图5 岩石膨胀性试验样品照片

Fig.5 Photos of rock swelling test samples

表3 古近系地层膨胀率及膨胀力试验成果
Table 3 Test results for expansion rate and expansion force of Paleogene strata

地层岩性	野外编号	组号	轴向自由膨胀率/%	径向自由膨胀率/%	侧向约束轴向膨胀率/%	膨胀压力 P_s /MPa	备注	
泥岩	PZ-1	1	2.55	2.51		0.28		
		2	2.77	3.26		0.2		
		3	3.27	2.61		0.21		
	D39-1	4	2.63	2.88		0.62		
		5	4.49	2.34		0.58		
		6	4.1	1.96		1.25		
	D39-2	7	5.94	1.65		0.43		
		8	3.08	5.63		0.78		
		9	4.51	3.64		0.9		
	砂质泥岩	D39-3	10	3.1	2.5		1.24	
			11	3.52	2		1.23	
			12	2.9	3.07		1.07	
D56-1		19	2.65	2.63		1.02		
		20	3.45	2.62		1.3		
		21	3.22	3.45		1.2		
D56-1		22	2.03	3.25		0.41		
		23	1.89	4.26		0.43		
		24	3.61	3.52		0.32		
平均值			3.32	2.99		0.75		
含砾砂岩		D46-1	13	5.5	0.63		0.28	1.0 h后崩解
	14		4.46	0.35		0.21	崩解	
	15		2.4	0.84		0.23		
	D46-2	16	2.5	1.35		0.23	1.0 h后崩解	
		17	3.19	0.3		0.23	1.2 h后崩解	
		18	3.97	0.3		0.14	1.3 h后崩解	
平均值		3.67	0.63		0.22			
含砾砂岩	SZK24-1	SZK24-1	1.68	1.61	1.75	0.069		
		SZK24-2	1.53	1.31	1.15	0.006		
		平均值	1.61	1.46	1.45	0.04		

含砾砂岩为非膨胀岩。从膨胀力试验数据看古近系砂质泥岩为弱膨胀岩;古近系泥岩为弱膨胀岩—强膨胀岩;新近系泥岩为弱膨胀岩—中膨胀岩;古近系含砾砂岩为非膨胀岩,由于砾石含量、砾石尺寸相差大,岩石均一性较差,膨胀率与膨胀力试验结果差异较大。

2.3 岩石耐崩解性试验

为分析引黄济宁工程隧洞岩石的崩解性,共采取18组古近系岩样进行耐崩解性试验,其中泥岩12组,砂质泥岩4组、含砾砂岩2组,部分岩石样品见图6所示,试验成果见表4所示。



图6 岩石崩解性试验样品照片

Fig.6 Rock samples for rock collapse resistance test

表4 岩石耐崩解性试验结果

Table 4 Test results for rock collapse resistance

地层岩性	编号	耐崩解指数 I_d / %
泥岩	PZ-1	76
		60.41
	D39-1	66.08
		84.59
	D39-2	71.51
		65.29
	D39-3	71.01
		76.66
	D56-1	94.73
		98.34
		92.76
		93.86
平均值	79.27	
砂质泥岩	D46-1	29.27
		33.61
	D46-2	28.95
		23.88
平均值	28.93	
含砾砂岩	SZK24-1	18
	SZK24-2	12.9
	平均值	15.45

2.4 综合分析

通过对引黄济宁工程隧洞古近系地层岩石进行物理力学、膨胀性和耐崩解性试验,可以看出,古近系地层岩石密度较低,吸水率较高;饱和状态下岩石单轴抗压强度急剧降低,软化系数极低;部分岩性具有膨胀性;少量岩性耐崩解性较差。总体上,引黄济宁工程隧洞古近系地层岩石在富水条件下力学性能差,特别是砂质泥岩遇水可能发生膨胀及崩解,对围岩稳定不利。

3 围岩变形特征初步分析

引黄济宁工程隧洞古近系地层分布范围广,隧洞埋深大,洞身多位于地下水位以下,施工中具备发生软岩变形的条件,在施工前的勘察设计阶段需要对软岩变形进行初步评价,为工程设计、投资估算等提供依据。

隧洞软岩变形评价有较多的评价方法,本文采用《水力发电工程地质手册》(2011)^[21]的评价方法,此方法根据较多的水利水电工程经验,对软岩变形进行了统计分析,适用于水工隧洞软岩变形的评价。其根据岩体强度与断面最大初始主应力比值(S)的大小,对软岩的挤压变形程度进行初步预测评价,计算公式如下:

$$S = \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{max}} \quad (1)$$

式中: S ——岩体强度应力比,无量纲; σ_{cm} ——岩体单轴饱和抗压强度,MPa; σ_{max} ——岩体初始主应力,有可能是最大水平主应力,也有可能是垂直主应力,MPa。

按上述计算方法,提出的软岩的挤压变形分级标准见表5所示。

引黄济宁工程隧洞古近系地层围岩软岩变形

表5 《水力发电工程地质手册》软岩挤压变形分级

Table 5 Classification of soft rock compression deformation according to the Geological Manual for Hydroelectric Power Engineering

强度应力比 S	变形分级
≥ 0.45	基本稳定
0.45~0.30	轻微挤压
0.30~0.20	中等挤压
0.20~0.15	严重挤压
< 0.15	极严重挤压

计算过程中,岩体单轴饱和抗压强度按不同岩性的平均值取为0.60 MPa,初始主应力采用垂直主应力,即自重应力。岩体密度取为 2.35 g/cm^3 ,隧洞埋深考虑10~1000 m。计算结果如图7所示。

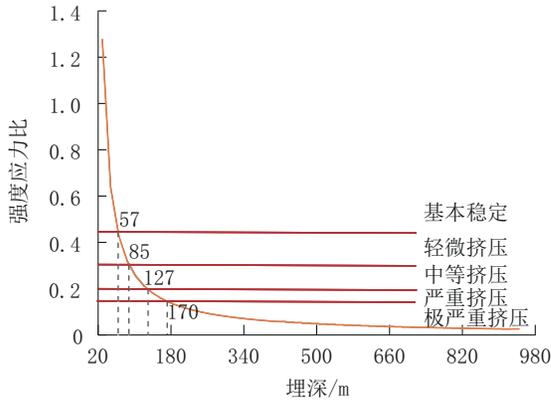


图7 围岩强度应力比-埋深关系

Fig.7 Relationship between the strength stress ratio and the burial depth curve of surrounding rock

由图7可知,引黄济宁工程隧洞古近系地层当埋深 $< 57 \text{ m}$ 时,强度应力比 > 0.45 ,围岩基本稳定;当埋深在 $57 \sim 85 \text{ m}$ 时,围岩强度应力比在 $0.45 \sim 0.30$,围岩产生轻微挤压变形;当埋深在 $85 \sim 127 \text{ m}$ 时,围岩强度应力比在 $0.30 \sim 0.20$,围岩产生中等挤压变形;当埋深在 $127 \sim 170 \text{ m}$ 时,围岩强度应力比在 $0.20 \sim 0.15$,围岩产生严重挤压变形;当埋深 $> 170 \text{ m}$ 时,围岩强度应力比 < 0.15 ,围岩产生极严重挤压变形。在实际的钻孔施工过程中,发现了软岩变形现象,如桩号 $38+100$ 的SCZK06钻孔钻进至 150 m 时,由于设备故障,停钻 2 d 后,孔内出现了明显的缩径,钻具无法下到孔底,需要扫孔后方能继续钻进。

参考类似工程经验,当隧洞产生严重挤压变形时,可能造成人员伤亡、工期延误、投资增加等不良后果。经分析,引黄济宁工程隧洞古近系地层发生严重挤压—极严重挤压变形的可能性大,施工中应根据围岩变形特征,有针对性地采取工程措施,以减少围岩变形的危害。

4 结语

(1)引黄济宁工程隧洞古近系地层围岩岩石密度较低,吸水率较高;饱和状态下岩石单轴抗压强度急剧降低,软化系数极低;部分岩性具有膨胀性;

少量岩性耐崩解性较差。引黄济宁工程隧洞古近系地层岩石在富水条件下力学性能差,对围岩稳定不利。

(2)当埋深 $> 127 \text{ m}$ 时,引黄济宁工程隧洞古近系围岩可能产生严重—极严重挤压变形,施工中应根据围岩变形特征,有针对性地采取工程措施,以减少围岩变形的危害。

参考文献(References):

- [1] 钮新强,张传健.复杂地质条件下跨流域调水超长深埋隧洞建设需研究的关键技术问题[J].隧道建设(中英文),2019,39(4):523-536.
NIU Xinqiang, ZHANG Chuanjian. Some key technical issues on construction of ultra-long deep-buried water conveyance tunnel under complex geological conditions [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 523-536.
- [2] 邓铭江.深埋超特长输水隧洞TBM集群施工关键技术探析[J].岩土工程学报,2016,38(4):577-587.
DENG Mingjiang. Key techniques for group construction of deep-buried and super-long water transfer tunnel by TBM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 577-587.
- [3] 王吉亮,向家波,颜慧明,等.引江补汉工程输水线路工程地质选线研究[J].长江科学院院报,2023,40(5):100-105.
WANG Jiliang, XIANG Jiabo, YAN Huiming, et al. Route selection for water diversion project from Three Gorges Reservoir to Hanjiang River based on engineering geology [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(5): 100-105.
- [4] 杜小洲.引汉济渭秦岭输水隧洞关键技术问题及其研究进展[J].人民黄河,2020,42(11):138-142.
DU Xiaozhou. Key technical issues in Qinling Water diversion tunnel of Hanjiang-to-Weihe River project and research advancements [J]. Yellow River, 2020, 42(11): 138-142.
- [5] 房勇,钱锋,周策,等.水平孔多参数综合测试仪器研发与应用[J].钻探工程,2024,51(1):97-105.
FANG Yong, QIAN Feng, ZHOU Ce, et al. Development and application of multi-parameter integrated testing instrument for horizontal hole [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 97-105.
- [6] 郑家坚.中国地层典-第三系[M].北京:地质出版社,1999.
ZHENG Jiajian. Tertiary Strata of China: Tertiary System [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.
- [7] 程向民,张劲.引黄入晋工程第三系红黏土特性与工程处理措施[J].水利水电工程设计,2014,33(1):10-12.
CHENG Xiangmin, ZHANG Jin. Engineering features and treatment measures on tertiary red clay of Yellow River diversion project (North Main) [J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2014, 33(1): 10-12.
- [8] 周焯.双液回退劈裂注浆在胡麻岭隧道富水粉细砂地层中的应用[J].现代隧道技术,2012,49(4):165-169.
ZHOU Ye. Application of two-component backward split grouting to the Humaling tunnel in water-rich fine sand [J]. Modern

- Tunnelling Technology, 2012, 49(4):165-169.
- [9] 池建军, 刘登学, 丁秀丽, 等. 第三系泥岩隧洞围岩大变形成因及应对措施[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(10):88-96.
CHI Jianjun, LIU Dengxue, DING Xiuli, et al. Causes and countermeasures of large deformation in a tunnel with Tertiary mudstone[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(10):88-96.
- [10] 苏航, 王云川, 刘东. 浅埋引水隧洞穿越第三系变形特征研究[J]. 人民珠江, 2018, 39(12):152-156, 178.
SU Hang, WANG Yunchuan, LIU Dong. Research on deformation characteristics of shallow buried diversion tunnel passing through Tertiary stratum[J]. Pearl River, 2018, 39(12):152-156, 178.
- [11] 李军, 李勇, 谢小国, 等. 狮子洋主航道水平勘察孔测井评价方法研究与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(6):21-29.
LI Jun, LI Yong, XIE Xiaoguo, et al. Research and application of the logging evaluation method for horizontal holes in the main channel of Shiziyang[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6):21-29.
- [12] 吕龙龙, 廖红建, 伏映鹏, 等. 胡麻岭隧道红层软岩的侧限与三轴压缩力学特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(4):1362-1370.
LYU Longlong, LIAO Hongjian, FU Yingpeng, et al. Experimental study on mechanical properties of red bed soft rock from Humaling tunnel in confining and triaxial compression tests[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(4):1362-1370.
- [13] 朱举. 水对第三系砂质砾岩力学特性影响的试验研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(23):1-3, 91.
ZHU Ju. Test study on the influence of water on mechanical properties of the Tertiary sandy conglomerate[J]. Engineering and Technological Research, 2023, 8(23):1-3, 91.
- [14] 张献伟, 洪开荣, 常翔, 等. 第三系泥岩工程特性与仰拱施工技术研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2):214-219.
ZHANG Xianwei, HONG Kairong, CHANG Xiang, et al. Study on engineering characteristics of Tertiary mudstone and construction technology of inverted arch[J]. Modern Tunneling Technology, 2021, 58(2):214-219.
- [15] 于洪洋. 渗流作用下第三系半成岩地层弱胶结砾岩隧道掌子面稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
YU Hongyang. Stability analysis for tunnel face of the weak cemented conglomerate in the Tertiary semi-diagenetic strata under seepage[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [16] 孙刚, 朱泳, 赵敏, 等. 基于水平钻探的地形变观测平洞勘察方法研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(2):154-160.
SUN Gang, ZHU Yong, ZHAO Min, et al. Research on investigation method of terrain change observation adits based on horizontal drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2):154-160.
- [17] 黄河勘测规划设计研究院有限公司. 青海省引黄济宁工程可行性研究报告[R]. 郑州: 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 2020.
Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd. Feasibility study report of the Yellow River to Xining water diversion project in Qinhai Province[R]. Zhengzhou: Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., 2020.
- [18] 胡彬, 张春霞, 吴海斌, 等. 西宁盆地始新世河湖相沉积序列黏土矿物组合特征及其古环境意义[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(3):569-583.
HU Bin, ZHANG Chunxia, WU Haibin, et al. Clay mineralogy of an Eocene fluvial-lacustrine sequence in Xining Basin, Northwest China, and its paleoclimatic implications[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(3):569-583.
- [19] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程: SL/T 264—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for rock tests in water and hydropower projects: SL/T 264—2020[S]. Beijing: China Water Power Press, 2020.
- [20] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
The Editing Committee of Geological Engineering Handbook. Engineering Geology Handbook (Fifth Edition)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [21] 彭士标, 袁建新, 王惠明. 水力发电工程地质手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
PENG Tubiao, YUAN Jianxin, WANG Huiming. Handbook of Hydropower Engineering Geology[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2011.

(编辑 王文)