

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202001001

# 某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究

刘超<sup>1</sup>, 袁伟<sup>2</sup>, 路军富<sup>1</sup>, 张钊<sup>1</sup>

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 西南地区 YD 隧道在运营期间隧道底部多段发生隆起变形, 造成无砟轨道板开裂, 导致轨道结构受损不稳定, 影响行车安全。为了探明其底鼓原因, 现对底鼓段紫红色缓倾层状粉砂质泥岩进行微宏观工程特性研究, 分析其对隧道底鼓的影响。采用室内试验的方法, 对该处粉砂质泥岩的物质组成成分、微观结构、膨胀性、抗剪抗压强度、压缩变形等围岩性质开展全面试验, 并对围岩地应力、水文地质条件进行现场调查。试验和调查结果表明: 研究区围岩根据岩石质量评价标准可以判定为 IV 级围岩; 其岩石成分主要为伊利石、石英、绿泥石等, 不含蒙脱石这种膨胀性黏土矿物, 自由膨胀率最大为 1.96%, 不具备膨胀性; 岩石的层面上分布有 2~8 μm 大小的孔隙, 岩石内部存在长度为 3~8 μm 的原生裂纹; 岩石的单轴饱和抗压强度为 11.3~21.8 MPa, 属于较软岩; 岩石的物理力学参数受含水量的影响较大, 随着含水量的增加, 内聚力缩减 50%, 抗压强度缩减了 45%~55%, 弹性模量缩减了 50%。研究结果显示研究区岩体在水理作用下岩石强度会大幅度降低, 但不含膨胀性矿物, 不具备膨胀性。且根据现场监测, 地下水位无变化, 因此地下水膨胀性不是隧道底鼓的直接诱因。

**关键词:** 铁路隧道; 隧道底鼓; 物质组成; 微观结构; 膨胀性

中图分类号: U458

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0108-08

## A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel

LIU Chao<sup>1</sup>, YUAN Wei<sup>2</sup>, LU Junfu<sup>1</sup>, ZHANG Zhao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** During the operation of the southwestern YD tunnel, heaving appeared in multiple sections at the bottom of the tunnel, which caused the ballastless track slab to crack, resulting in damage and instability to the track structure and affecting the driving safety. The bottom drum of a tunnel is of strong regional characteristics, and the causes of the bottom drum are various. Studies at home and abroad can only discuss some tunnels. In order to find out the cause of the floor structure heaving, the micro-macro-engineering characteristics of the purplish red gently dipping layered silty mudstone in the floor structure heaving section are examined, and its influence on the tunnel floor structure heaving is analyzed. The laboratory experiment method is used to conduct comprehensive experiments on the surrounding rock properties such as the material compositions, microstructure, swelling, shear compressive strength, compression deformation of the silt mudstone, and the ground stress and hydrogeological conditions of the surrounding rock. Experiments and investigations show that the surrounding rocks in the study area can be judged as grade IV surrounding rocks

收稿日期: 2020-01-01; 修订日期: 2020-03-07

基金项目: 四川省科技计划项目重点研发项目资助(2018GZ0057); 四川省科技计划项目面上项目资助(2018JY0136)

第一作者: 刘超(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事隧道设计研究工作。E-mail: 1139779935@qq.com

according to rock quality evaluation standards. Its rocks are mainly composed of illite, quartz, chlorite, etc. It does not contain swelling clay minerals such as montmorillonite. There are pores with a size ranging from 2 to 8  $\mu\text{m}$  on the bedding plane of the rock, and there are primary cracks with a length of 3 ~ 8  $\mu\text{m}$  inside the rock. The uniaxial saturated compressive strength of the rock ranges from 11.3 to 21.8 MPa, and the rock belong to softer rocks. The physical and mechanical parameters of the rocks are greatly affected by water content. As the water content increases, the cohesion decreases by 50%, the compressive strength decreases by 45% ~ 55%, and the elastic modulus decreases by 50%. The rock mass in the study area does not contain swellable minerals and is not expansive. At the same time, the groundwater level has not changed through on-site monitoring, so groundwater and expansion are not the direct inducements of the tunnel bottom drum. In short, the geological characteristics of the surrounding rocks of the tunnel are complex and special, and the cause of the tunnel bottom drum is not necessarily single. For the analysis of a tunnel bottom drum, multiple angles need to be analyzed.

**Keywords:** railway tunnel; floor structure heaving; material composition; microstructure; expansion

随着我国隧道建设的不断发展,越来越多的长大隧道在穿越崇山峻岭时面临复杂不良地质条件的挑战<sup>[1-2]</sup>。其中穿越高地应力区且地质环境恶劣的软弱围岩时,在隧道建设和养护过程常会出现隧道底鼓的现象。底鼓是隧道围岩变形与破坏的主要表现形式,会造成隧道底部结构破坏影响轨道结构稳定性,从而影响工程质量和运营寿命,而且对隧道的施工和运营安全产生极大的威胁<sup>[3-4]</sup>。

姜耀东等<sup>[5]</sup>通过大量的实验和数值计算,将隧道底鼓分为4种类型,为之后的隧道底鼓研究提供了参考。薛晓辉等<sup>[6]</sup>通过分析武都西隧道底鼓的形成机理和特点,推导出隧道底板产生压曲破坏时的临界荷载表达式,并进一步研究了隧道底鼓防治措施。腾俊洋等<sup>[7]</sup>结合室内试验和数值模拟的方法分析了地下水对层状炭质页岩隧道底鼓的影响。樊纯坛<sup>[8]</sup>通过室内试验、现场检测及数值模拟等方法对大断面富水泥岩隧道受力特性及仰拱底鼓机理进行了研究。王进博等<sup>[9]</sup>采用室内岩石物理力学试验和数值模拟的方法,分析了马嘴隧道左线水平层状页岩底鼓机理并对底鼓措施进行了研究。Heuze<sup>[10]</sup>、Kovari等<sup>[11]</sup>认为底板岩层受到的拉应力大于自身应力,底板岩层会遭受破坏向隧道内隆起。本文以YD隧道底鼓段粉砂质泥岩为研究对象,通过现场调查和室内试验的研究方法,探明研究区内隧道底部岩石的工程地质特征。研究主要从微观和宏观两方面考虑,包括隧道底部岩石的组成成分、微观结构、膨胀性、抗剪强度、抗压强度等内容。分析隧道底部岩石的工程力学特性对隧道底鼓产生的影响,为该隧道的底鼓治理提供科学依据与理论支持,也为今后类似地区铁路隧道设计、施工和运营维

护提供依据。

## 1 工程概况

YD隧道全长7 858 m,是一条客货共线双线铁路隧道。该隧道系双块式无砟轨道,隧道为马蹄形断面且采用复合式衬砌,研究区通过新奥法组织施工,采用光面爆破及湿喷技术进行开挖衬砌。隧道初次衬砌为C20喷射混凝土,二衬和仰拱采用C25钢筋混凝土。复合式衬砌厚度为0.4 m,仰拱厚度为0.45 m。YD隧道2019年2月竣工,7月运营。隧道运营至今,共有4段底鼓较明显,如图1所示,分别为:(1)K106+300~+350,埋深105 m;(2)K108+010~+020,埋深290 m;(3)K108+600~+640,埋深184 m;(4)K109+250~+280,埋深114 m。

工程区岩性为上侏罗统蓬莱镇组( $J_3p$ )的紫红色、棕红色薄至中厚层状泥岩、粉砂质泥岩,夹粉砂岩及细粒长石砂岩,砂岩厚度均小于5 m,其间夹有1层灰绿色水云母黏土岩(又称“仓山页岩”)。节理不甚发育,主要为表层风化裂隙,属Ⅲ级围岩,局部为Ⅳ级软岩。区域上部厚420 m,测区地层出露不全,出露厚度为120 m。通过钻孔揭示,底鼓段隧底主要以紫红色粉砂质泥岩为主,实测范围内最大水平主应力为14.2~16.7 MPa,最小水平主应力为4.8~9.3 MPa。经现场监测地下水位无变化,地下水位稳定后水位普遍位于隧道仰拱回填层顶面以下0.1~1.0 m范围,地下水不具承压性<sup>[12]</sup>。

现对该段隧道底部岩石进行微观组构和宏观力学特性研究,分析其工程力学特性。在YD隧道桩号K106+300~K109+280区间中的底鼓段钻孔取样,并

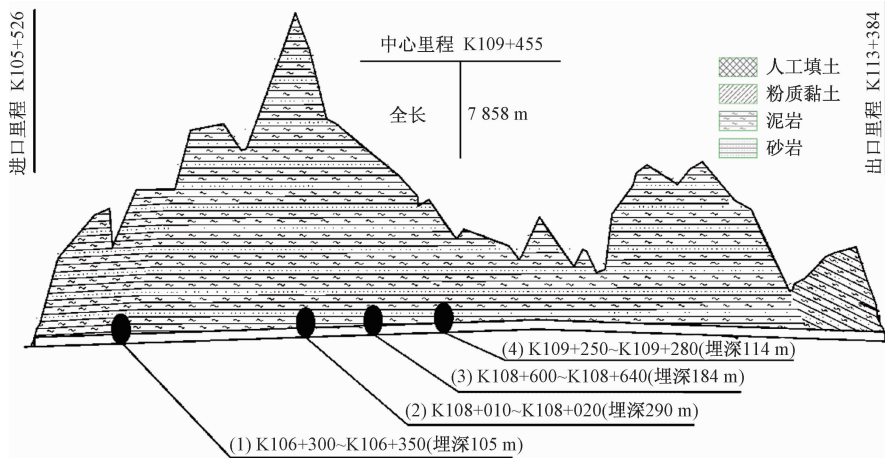


图 1 底鼓段位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the kick drum position

立即采用保鲜膜封存,置于阴凉处,然后运往实验室进行标准试样的制作。

### 2 围岩物理力学特性研究方法

本次试验主要针对 YD 隧道底部粉砂质泥岩的工程特性开展研究,参考其他学者研究方法<sup>[13-14]</sup>,主要试验内容包括:X 粉晶衍射试验、扫描电镜试验、岩石的膨胀率试验及岩石的抗压抗剪强度试验。根据 TB 10115—2014《铁路工程岩石试验规程》中的方法<sup>[15]</sup>,选取 K106 + 300 ~ K109 + 280 区间保存完好的岩样进行试验,试验具体准备如下:

#### (1) X 粉晶衍射试验

将所取岩样敲碎成小块分别研磨 15 ~ 20 min,取 1.300 0 ± 0.001 0 g 的样品制样。采用 DX—2700 型衍射仪,在 CuKα, Ni 滤光条件下,对粉砂质泥岩进行物相分析,检测出所含矿物成分的相对含量。

#### (2) 扫描电镜试验

从所取试样上取下一小块样品,选定垂直层理的表面和层理面为观测面,预先对观测面用极细的砂纸打磨,然后放入氩离子抛光仪进行抛光,薄片大小为 0.6 mm × 0.6 mm × 0.2 mm 左右,抛光面积 3 ~ 5 mm<sup>2</sup>。然后采用 697 Ilion II 氩离子抛光系统对试样进行处理,最后放在 S3 000N 扫描电子显微镜下进行观察。

#### (3) 膨胀性试验

将岩样加工成 5 cm × 5 cm × 5 cm 的标准试件,精度为 ± 1 mm,共 2 组,每组 3 个试样。通过自由膨胀率试验仪,利用室内根据现场所取水样调配出来的水样进行试验。现场水样成分:1L 地下水主要含 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

(399.61 mg)、Cl<sup>-</sup> (209.86 mg)、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (146.45 mg)、Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup> (226 mg) 等。

#### (4) 直剪强度试验

采用便携式岩土力学性质多功能直剪试验仪将加工成 5 cm × 5 cm × 5 cm 正方体试样,每组 5 个进行试验。设定好法向千斤顶压力表预定值,并按照一定梯度变化进行 5 组试验。

#### (5) 单轴压缩及变形试验

将所取岩样加工成 5 cm × 10 cm (r × h) 圆柱体试样,利用 MTS815 电液伺服控制刚性试验机,轴向力垂直层理面施加,用岩石试件的变形控制加载速度,从而得到岩石的单轴抗压强度。在试件上安放轴向位移计和环向引伸计,用以量测试件在受力过程中的轴向位移和环向的变形。试验中所取试样主要选取的是底鼓段的钻孔岩样,岩性均为粉砂质泥岩,每组试样个数为 2 个。其中 K109 + 266 处取样采用自然浸水饱和制样。

### 3 围岩物理力学特性研究结果及分析

#### 3.1 微观成分及结构分析

##### 3.1.1 X 粉晶衍射试验

岩石的膨胀性与岩石的组成成分密切相关,其中,黏土矿物蒙脱石和高岭石对其影响最为明显<sup>[16-18]</sup>。

经过试验,研究区粉砂质泥岩以黏土矿物和碎屑矿物为主,黏土矿物以伊利石为主,含量在 30% 左右;绿泥石次之,含量在 17% 左右;碎屑矿物以石英为主,含量在 30% 左右,局部位置略少。由此可见,该研究区段矿物成分组成基本相同,矿物成分含量存在细微差异。从岩石的成分看,该地区岩石成分不含蒙脱石和高岭石,不具有吸水膨胀性。各区段岩石组成成分

相对含量见表1。K106 + 326处矿物鉴定成果如图2所示。

表1 主要矿物含量

	Table 1 Main mineral content						/%
	伊利石	石英	绿泥石	方解石	斜长石	硬石膏	
K106 + 326	31.08	31.65	17.13	9.33	7.87	-	
K107 + 652	37.27	23.53	19.11	8.52	6.34	2.78	
K106 + 852	31.12	26.00	19.41	14.43	2.43	-	
K108 + 645	26.19	31.00	15.01	9.83	8.11	6.99	
K109 + 266	30.34	31.33	17.13	7.17	6.98	-	

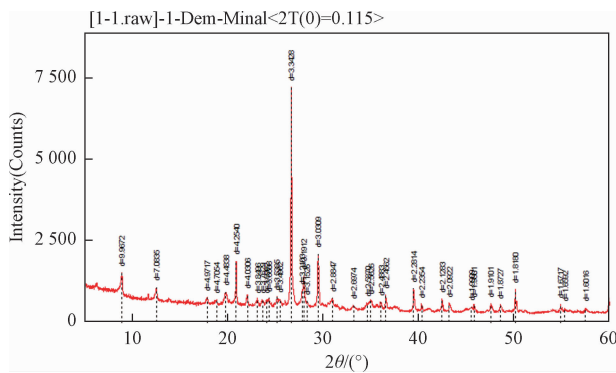


图2 K106 + 326处矿物成分鉴定成果图

Fig. 2 Results of mineral composition identification at K106 + 326

### 3.1.2 扫描电镜试验结果

(1) K107 + 652 桩号处隧道底部 1.5 m 处试样

由图3可知,将粉砂质泥岩沿着垂直层理面进行抛光处理,放大 20 000 倍后,可发现大量的细小原生裂纹,呈网状发育,整体呈现不规则的狭缝状,最长的裂纹为 6 μm 左右。由于此处粉砂质泥岩内部存在微裂纹,当岩石受到较大水平剪切力时,层间的微裂隙更容易贯通形成更宽更长的裂缝,最终沿着层理面产生相对位移。

由图4可知,将粉砂质泥岩试样层理面放大 40 000 倍后,可以清晰看到粒状的石英颗粒与片状伊利石相互存在,并夹杂少量的绿泥石和方解石,伊利石排列呈片状分布,具有一定的方向性。粉砂质泥岩矿物以片状为主,片状排列较为紧密,其间夹杂许多颗粒状矿物如石英等。

(2) K108 + 645 桩号处隧道底部以下 2.4 m 试样

由图5可知,将所取粉砂质泥岩岩样放在扫描电子显微镜下放大 5 000 倍,能够清晰观测到微观结构呈现片状,排列较为紧密,且具有一定的方向性,片状基质结构表层分布有少量碎屑颗粒。片状伊利石间存在孔洞及细小裂纹,最大的孔洞直径约为 8 μm 左右,

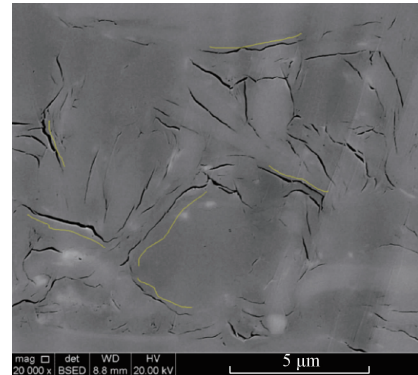


图3 垂直于层理面上裂纹发展图

Fig. 3 Diagram showing the crack development perpendicular to the bedding plane

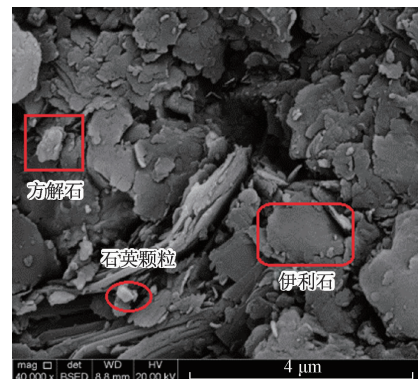


图4 放大 40 000 倍层理面上微观展布

Fig. 4 Micro-view of the bedding plane after 40 000 times magnification

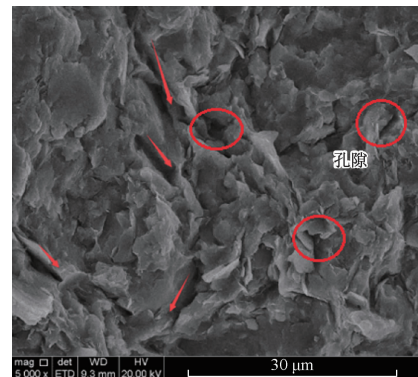


图5 放大 5 000 倍的裂纹和裂隙分布

Fig. 5 Crack and crack distribution after 5 000 times magnification

最小的孔洞直径仅为 2 μm 左右,裂纹长度为 3 ~ 8 μm,未见明显的石英颗粒。

### 3.2 宏观力学特征研究

#### 3.2.1 膨胀性试验

所制岩样按照试验要求进行操作,经过 90 h 的浸



泡,试样的轴向和径向变形结果如下:

由图6中数据可知,岩样在原状水样浸泡下,前10h变形较为明显,随后岩样浸水变形速度减缓,岩样浸水膨胀变形,轴向变形大于径向变形。岩石的自由膨胀率与岩石的性质有关,岩石泥质含量越多,自由膨胀率相对就越高。根据TB 10038—2012《铁路工程特殊岩土勘察规程》,K106+326处岩石最大轴向自由膨胀和最大径向自由膨胀分别为1.96%、1.31%;K107+652处岩石最大轴向自由膨胀和最大径向自由膨胀分别为0.39%、0.05%,均属于非膨胀性岩石<sup>[19-20]</sup>,结合X粉晶衍射试验,可知此处的隧道底鼓

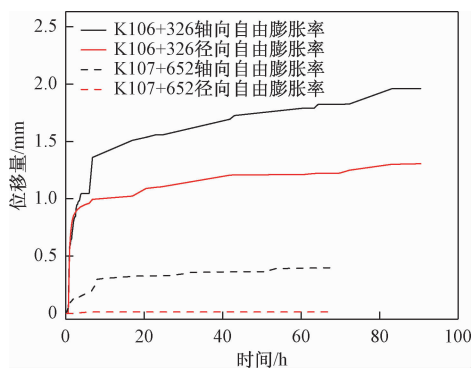


图6 粉砂质泥岩浸水自由膨胀曲线

Fig.6 Free-swelling curve of silty mudstone immersion in water

不是由岩石的膨胀性导致的。研究区岩石存在微小原生裂隙,可能在地下水侵蚀下破裂甚至崩解,降低岩石的强度。

### 3.2.2 直剪强度试验

按照要求,经过一系列试验,岩样剪切破坏后的形态特征如图7所示。当剪切方向平行层理面时,剪切破坏面沿着层理面方向;当剪切方向垂直层理面时,破坏面垂直层理面,但是岩样还会沿着层理面产生裂纹。沿层理面的岩石强度明显相对较弱。

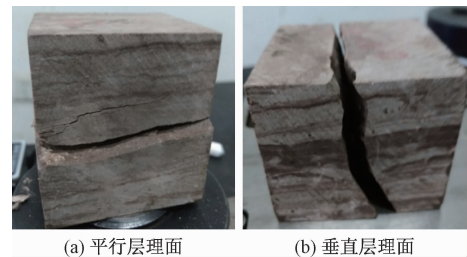


图7 粉砂质泥岩剪切破坏形态

Fig.7 Shear failure morphology of the silty mudstone

不同地段的粉砂质泥岩直剪强度试验研究成果如表2所示。表2表明,平行层理面时,岩石黏聚力1.45~3.56 MPa,内摩擦角42.4°~56.9°。垂直层理面时,岩石黏聚力3.98~5.84 MPa,内摩擦角56.7°~62.1°。

表2 直剪强度试验成果表

Table 2 Direct shear strength test results

取样点	岩性	含水状态	层理关系	黏聚力 $c$ /MPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	剪应力 $\tau$ 与正应力 $\sigma$ 关系	$R^2$
K106+326	粉砂质泥岩	1.88% (天然)	平行	1.45	42.39	$\tau = 0.8509\sigma + 1.449$	0.967
			垂直	3.98	56.66	$\tau = 1.5298\sigma + 3.982$	0.944
K106+852	粉砂质泥岩	1.22% (天然)	平行	3.97	56.88	$\tau = 1.5331\sigma + 3.967$	0.982
K107+652	粉砂质泥岩	1.17% (天然)	平行	1.46	43.68	$\tau = 0.9549\sigma + 1.461$	0.976
			垂直	3.56	53.59	$\tau = 1.3559\sigma + 3.563$	0.906
K108+645	粉砂质泥岩	1.47% (天然)	平行	1.81	47.63	$\tau = 1.0963\sigma + 1.805$	0.972
			垂直	3.94	54.63	$\tau = 1.4089\sigma + 3.949$	0.954
K109+266	粉砂质泥岩	1.76% (天然)	平行	5.84	62.06	$\tau = 1.8852\sigma + 5.837$	0.967
			垂直	1.90	43.50	$\tau = 0.9489\sigma + 1.895$	0.976

### 3.2.3 单轴抗压强度及变形试验

由K106+326和K109+266处试验结果可知平行层理面剪切比垂直层理面剪切,内摩擦角和黏聚力更小(图8),不难推测隧道底部岩石在水平高地应力下容易破坏。此外,由K108+645和K109+266处试验结果可知,水对岩石的黏聚力和内摩擦角影响明显,饱水状态下,黏聚力下降50%左右。结合扫描电镜试验,隧道底部岩石内部存在原生裂缝,若在地下水和地应力的综合作用下,岩石容易产生剪切破坏,从而使隧

道底部岩石产生变形。

由粉砂质泥岩单轴压缩试验应力-应变曲线可以看出(图9),岩石先经历压密阶段、弹性阶段、屈服阶段3个阶段,由于没有围压的存在,单轴压缩很难观测到应变软化段,即岩石达到峰值强度后,岩石发生破坏<sup>[21-22]</sup>。

从压缩破坏后粉砂质泥岩的破坏形态可以看出,试件为竖向劈裂破坏,裂纹以竖向发展为主,在压缩过程中竖向裂纹贯通,形成贯通的裂缝,最终试件被破

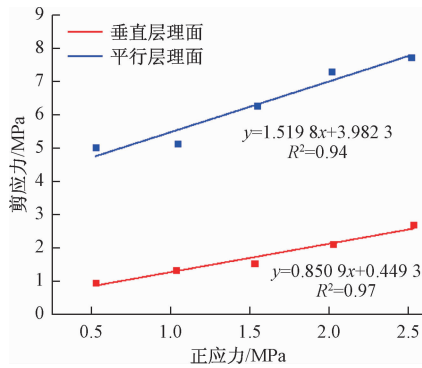


图 8 K106 + 326 附近粉砂质泥岩

Fig. 8 Silty mudstone near K106 + 326

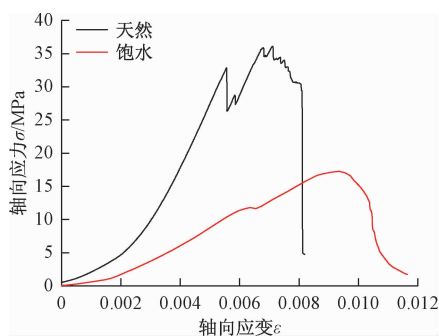


图 9 粉砂质泥岩天然(饱水)应力应变曲线

Fig. 9 Natural (saturated) stress-strain curve of the silty mudstone

坏。其中天然含水条件的试件在应力作用下,试件边缘先产生不贯通裂缝,致使应力释放,使应力-应变曲线呈现起伏不平,最终形成贯通裂缝,受轴向应力骤降(图 10a)。而饱水试件强度较弱,随着应力增加岩石将直接产生竖向贯通裂缝发生破坏(图 10 b)。

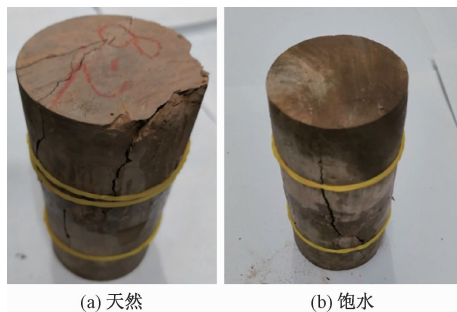


图 10 粉砂质泥岩破坏形态

Fig. 10 Silt mudstone failure morphology

通过应力-应变曲线计算得出粉砂质泥岩单轴压缩试验的参数如表 3 所示。

研究区段的粉砂质泥岩平均单轴抗压强度为 34.78 ~ 42.03 MPa,弹性模量为 4.06 ~ 4.86 GPa,泊松比为 0.26 ~ 0.34。其中 K109 + 266 粉砂质泥岩试样

为饱水试样,其抗压强度计算出来平均为 19.56 MPa,与自然状态下的粉砂质泥岩抗压强度相比较,折减了 45% ~ 55% 左右。弹性模量一般为 1.74 ~ 2.18 GPa,平均为 1.96 GPa,折减 50%,泊松比为 0.36。

表 3 粉砂质泥岩单轴试验成果

Table 3 Single-axis test results

取样点	取样深度/m	含水状态	试样个数	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
K106 + 326 附近	6.1 ~ 8.9	天然	2	36.12	4.48
				38.72	4.67
K107 + 652	4.4 ~ 5.0	天然	2	34.78	4.86
				39.30	4.31
K108 + 016 附近	10.4 ~ 11.0	天然	2	42.03	4.26
				35.25	4.06
K109 + 266	24.2 ~ 24.8	饱水	2	21.79	2.18
				17.33	1.74

由单轴试验结果看出,岩石在达到应力峰值产生竖向脆性破坏。在地应力作用下,岩石卸围压更容易使岩石破坏,且破坏程度也更为剧烈。根据 TB 10003—2005《铁路隧道设计规范》,饱和状态下抗压强度为 19.56 MPa,可以判定 YD 隧道底部紫红色层状粉砂质泥岩属于较软岩<sup>[23]</sup>。

根据《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)规定,此处  $R_c/\sigma_{max} = 1.37 < 4$ ,属于极高地应力的情况<sup>[24]</sup>,侧压力系数大于 1,可见地应力以水平应力为主导,随岩层深度的增加有增大的趋势。

### 3.3 岩体质量评价

YD 隧道 2009 年施工完成运营至今,根据资料记录工程区岩性为上侏罗统蓬莱镇组(J<sub>3p</sub>)的紫红色、棕红色薄至中厚层状泥岩、粉砂质泥岩,夹粉砂岩及细粒长石砂岩,砂岩厚度均小于 5 m,节理较发育,主要为表层风化裂隙。根据《工程岩体分级标准》,可以判断研究区岩体完整性指数  $K_v$  为 0.75 ~ 0.55。由单轴压缩变形试验可知,研究区紫红色粉砂质泥岩的单轴饱和抗压强度为 19.56 MPa,属于较软岩。综上得到 BQ 评价计算结果如表 4 所示。

表 4 BQ 评价计算表

Table 4 BQ evaluation calculation

$R_c$ /MPa	$K_v$	$BQ = 100 + 3R_c + 250K_v$
19.56	0.75 ~ 0.55	348.18 ~ 296.18

依据《工程岩体分级标准》中岩体质量分级表确定,将工程区岩体质量评级为 IV 级。

## 4 结论

(1) 研究区岩石的矿物成分组合基本相同,主要

物质为石英、伊利石和绿泥石,不含蒙脱石和高岭石。根据膨胀性试验,最大膨胀率为1.96%。综合分析研究区隧道底部岩石不具有膨胀性。

(2)根据扫描电镜试验,观测到平行层理的面上存在2~8 μm 粒间孔隙,岩石内部存在细小原生裂纹,长度为3~8 μm。这种分布在黏土矿物碎屑及石英颗粒之间孔隙和裂纹,容易使岩石在受到较大水平剪切力时,贯通形成更宽更长的裂缝,最终沿着层理面产生破坏。

(3)YD隧道底部紫红色粉砂质泥岩的平均单轴抗压强度为34.78~42.03 MPa,弹性模量为4.06~4.86 GPa,泊松比为0.26~0.34。平行层理面时,岩石黏聚力1.45~1.90 MPa,内摩擦角42.4°~56.9°。垂直层理面时,岩石黏聚力3.98~5.84 MPa,内摩擦角56.7°~62.1°。饱和抗压强度11.3~21.8 MPa,属于较软岩,综合岩石质量评价为Ⅳ级围岩。

(4)粉砂质泥岩抗剪和抗压强度随着含水率的增加而减小。饱水状态与天然状态相比内聚力缩减50%左右,抗压强度缩减了45%~55%,弹性模量缩减了50%。

(5)围岩岩体不具备膨胀性,现场监测地下水位无变化,因此地下水和膨胀性不是隧道底鼓的直接诱因。推测隧道底鼓主要诱导因素是地应力、层状岩体和岩石蠕变,这将作为下一步的研究重点。

#### 参考文献(References):

- [1] 谢勇谋. 国道317线鹫峰山隧道施工地质预报研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2004. [XIE Y M. Construction geology prediction research on Zhegu-mountain tunnel of 317 national highway [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004. (in Chinese)]
- [2] 张洋. 隧道工程软弱围岩大变形控制体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006. [ZHANG Y. Research on the controlling system of large deformation in the soft rock tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)]
- [3] 张后全, 韩立军, 贺永年, 等. 构造复杂区域膨胀软岩巷道底鼓控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 16-21. [ZHANG H Q, HAN L J, HE Y N, et al. Floor heave control in roadways with soft-and-swelling rocks in complicated structural area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 16-21. (in Chinese)]
- [4] 曲永新, 陈历鸿, 金春山. 膨胀岩学术讨论会概况[J]. 水文地质工程地质, 1986, 13(6): 12-13. [QU Y X, CHEN L H, JIN C S. Overview of swelling rock symposium [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1986, 13(6): 12-13. (in Chinese)]
- [5] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2396-2401. [JIANG Y D, ZHAO Y X, LIU W G, et al. Research on floor heave of roadway in deep mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2396-2401. (in Chinese)]
- [6] 薛晓辉, 张军, 宿钟鸣, 等. 武都西隧道底鼓机理及防治措施研究[J]. 公路工程, 2015, 40(5): 124-128. [XUE X H, ZHANG J, SU Z M, et al. Study on mechanism and prevention measures of floor heave in Wuduxi tunnel [J]. Highway Engineering, 2015, 40(5): 124-128. (in Chinese)]
- [7] 腾俊洋, 唐建新. 层状炭质页岩隧道底鼓机理分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(1): 110-116. [TENG J Y, TANG J X. Mechanism analysis of floor heave in layered carbonaceous shale tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(1): 110-116. (in Chinese)]
- [8] 樊纯坛. 大断面富水泥岩隧道受力特性及仰拱底鼓机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017. [FAN C T. Research on mechanical characteristics of large-section cement-rich rock tunnel and mechanism of bottom arch drum [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2017. (in Chinese)]
- [9] 王进博. 水平页岩隧道底鼓机理及控制技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017. [WANG J B. Mechanism and disposal technology of floor heave in horizontal shale tunnel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)]
- [10] HEUZE F E. High-temperature mechanical, physical and Thermal properties of granitic rocks—A review [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20(1): 3-10.
- [11] Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression; Revised version [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6): 285-290.
- [12] 王立川, 肖小文, 林辉. 某铁路隧道底部结构隆起病害成因分析及治理对策探讨[J]. 隧道建设,

- 2014, 34(9): 823 - 836. [WANG L C, XIAO X W, LIN H. Analysis on causes for and renovation of floor structure of a high-speed railway tunnel located in slightly-dipping interbedded rock mass [J]. Tunnel Construction, 2014, 34 (9): 823 - 836. (in Chinese)]
- [13] 孙良倩. 甘肃天水地区新近系泥岩工程特性试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(增刊2): 54 - 59. [SUN L Q. Experimental study of engineering properties of Neogene mudstone in Tianshui, Gansu[J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (Sup 2): 54-59. (in Chinese)]
- [14] 郑清松. 龙泉山红层砂岩微结构对其工程力学性质的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [ZHENG Q S. Research on the influence of microstructure of red beds sandstone on its engineering mechanical properties in Longquan mountain area [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)]
- [15] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程岩石试验规程: TB 10115—2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015. [Ministry of Railways of the People's Republic of China. Railway engineering rock test regulations: TB 10115—2014) [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015. (in Chinese)]
- [16] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 866 - 870. [HUANG H W, CHE P. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(7): 866 - 870. (in Chinese)]
- [17] 孙小明, 武雄, 何满潮, 等. 强膨胀性软岩的判别与分级标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 128 - 132. [SUN X M, WU X, HE M C, et al. Differentiation and grade criterion of strong swelling soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (1): 128 - 132. (in Chinese)]
- [18] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 28 - 31. [LIU C W, LU S L. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 28 - 31. (in Chinese)]
- [19] 郭永春, 谢强, 文江泉. 红层特殊岩土化学性质工程判别准则试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 85 - 88. [GUO Y C, XIE Q, WEN J Q. Experimental study of the engineering criterion of the chemical stability of red beds rock [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(6): 85 - 88. (in Chinese)]
- [20] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程特殊岩土勘察规程: TB 10038—2012[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2012. [Ministry of Railways of the People's Republic of China. Special Geotechnical Investigation Procedures for Railway Engineering: TB 10038—2012 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012. (in Chinese)]
- [21] 谢云鹏, 陈秋南, 黄小城, 等. 深埋隧道炭质板岩微观结构及单轴压缩试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 96 - 102. [XIE Y P, CHEN Q N, HUANG X C, et al. An experimental study of microstructure and uniaxial compression test of carbonaceous slate in a deep buried tunnel [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 96 - 102. (in Chinese)]
- [22] 袁广祥, 张路青, 曾庆利, 等. 花岗岩矿物组成与其单轴抗压强度的相关性研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 93 - 100. [YUAN G X, ZHANG L Q, ZENG Q L, et al. Correlation of the mineralogical characteristics with the uniaxial compressive strength of granite [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 93 - 100. (in Chinese)]
- [23] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2005[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005. [National Railway Administration. Design specification for railway tunnels: TB 10003—2005 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese)]
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Engineering rock mass classification standard: GB/T 50218—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)]