

文章编号: 1674—8247(2023)04—0084—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.04.016

宝峰隧道全风化砂岩主要工程地质问题 及对策研究

陈 松

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:宝峰隧道是中老铁路的控制性重难点工程,其区域地质构造作用异常强烈,地质条件极其复杂,涌水涌(流)砂、软岩大变形、掌子面失稳、地表沉降变形等成为制约隧道勘察设计和安全施工的重大难题。结合现场地质勘察、室内试验、物探等手段,查清了全风化粉细砂岩层的分布、主要工程地质问题及特征。针对宝峰隧道主要工程地质问题及特征,确定了合理的施工工艺,制定了主要工程地质问题防治对策。现场实施结果表明,对策有效可行。研究成果可为类似地质条件的隧道勘察、施工建设和支护结构设计提供参考。

关键词:宝峰隧道;中老铁路;饱和状全风化粉细砂岩;对策研究

中图分类号: TU452

文献标志码: A

84

A Study on Main Engineering Geological Problems and Countermeasures of Completely Weathered Sandstone in Baofeng Tunnel

CHEN Song

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

Abstract: Baofeng Tunnel is a crucial and challenging work for China-Laos Railway. The regional geological structure has an exceptionally strong effect, and the geological conditions are extremely complex. Issues such as water and sand inflow, significant deformation of soft rock, instability of working faces, and surface subsidence restrict tunnel investigation, design, and safe construction. By combining on-site geological surveys, laboratory experiments, and geophysics methods, the distribution, main engineering geological problems, and characteristics of completely weathered fine sandstone layers were determined. Based on the main engineering geological problems and characteristics of the Baofeng Tunnel, reasonable construction processes were determined, and countermeasures to address the main geological issues were developed. On-site implementation demonstrated that these countermeasures were effective and feasible. The results can provide a reference for tunnel investigation, construction, and support structure design under similar geological conditions.

Key words: Baofeng Tunnel; China-Laos Railway; saturated completely weathered silty fine sandstone; countermeasure study

收稿日期: 2022-03-25

作者简介: 陈松(1966-),男,高级工程师。

引文格式: 陈松. 宝峰隧道全风化砂岩主要工程地质问题及对策研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 84-88.

CHEN Song. A Study on Main Engineering Geological Problems and Countermeasures of Completely Weathered Sandstone in Baofeng Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 84-88.

1 工程地质特征

1.1 工程概况

中老铁路宝峰隧道位于昆明市晋宁县宝峰镇东部约3 km,全长7 377 m,为设计速度200 km/h的电气化双线铁路隧道,是中老铁路的控制性关键工程。隧道最大埋深约252 m,DK 11+380~+500段与昆玉高速公路32°斜交,隧道洞顶距公路路面高度约69 m,附近分布有高压线塔。宝峰隧道地处高烈度地震区,受普渡河活动断裂的影响,洞身穿越多条分支断裂,地质构造极为复杂。隧道围岩以前震旦系昆阳群板岩、砂岩为主,岩体非常破碎且富水。隧道施工多次出现涌水涌(流)砂、软岩大变形、掌子面失稳及地表沉降变形等情况。隧道下穿昆玉高速公路粉细砂岩段为Ⅵ级围岩,施工极为困难。

1.2 地形地貌

隧道穿越滇池盆地与玉溪盆地分水岭地带,为构造侵蚀、剥蚀低中山地貌,地形起伏较大,山脊与沟谷呈北东向相间排列展布,山脊高程1 990~2 240 m,山顶平缓,自然横坡15°~25°,局部稍陡,山间谷地高程1 960~1 990 m,相对高差30 m,沟谷相对宽缓。

1.3 气象水文

宝峰镇位于晋宁县城南部,北通昆明,南达玉溪,为亚热带季风气候。多年平均气温15.2℃,极端最高气温31.6℃,极端最低气温-8.1℃;年平均风速2.8 m/s,最大风速24.4 m/s;多年平均降雨量799.5 mm,最大日降雨量169.5 mm;相对年平均湿度71%。玉溪市多年平均气温16.7℃,极端最高气温33.4℃,极端最低气温4.8℃;年平均风速2.4 m/s,最大风速22 m/s;多年平均降雨量997 mm,最大日降雨量105.6 mm;相对年平均湿度72%。

宝峰隧道穿越金沙江与珠江水系分水岭,宝峰镇以北为金沙江水系,刺桐关以南为珠江水系,沿线主要水系与山脉多呈南北向展布。

1.4 地层岩性

1.4.1 施工概况

宝峰隧道自施工以来,DK 11+380~+480段发生涌水涌(流)砂共计7次,总流砂量约2 000 m³。涌水涌砂引起昆玉高速公路地表大面积沉降、开裂、塌陷,高速公路临时封闭、改道,洞内外应急抢险,安全风险极高。沉降区继续扩大将威胁到220 kV高压输电线铁塔的安全,后果严重。

为查明饱和状全风化粉细砂岩的分布、特征及性质等,对昆玉高速公路进行安全评价,并采取合适的

工程措施。针对隧道DK 11+380~+500段采用地质调绘、钻探、地震波CT、地质雷达等方法进行综合研究^[1-4]。

1.4.2 地层岩性

隧道基岩为前震旦系昆阳群黑山头组(Pt1hs)板岩、砂岩、灰岩及白云岩。基岩受构造强烈影响及岩性差异,形成了全风化砂岩富水囊状体。<3>层全风化(W₄)呈密实状粉细砂,为相对富水岩层,厚0~53 m,是本隧的地质灾害层,饱水状态下施工开挖扰动极易发生涌水涌(流)砂。<4>层板岩全风化带(W₄)较厚,大部分呈硬塑至半干硬状至粉质黏土状,为相对隔水层,厚5~33 m;强风化带(W₃)呈角砾土或碎石土状,厚10~30 m。

1.5 地质构造及水文地质特征

1.5.1 地质构造

区域地质构造复杂,隧道区发育普渡河断裂南延段次级宝峰断层、温水营平移断层。隧道区地震动峰值加速度为0.20 g。

该段地层褶曲发育,产状变化大,岩层产状由北向南为N45°W/45°NE, N75°E/84°SE, N67°W/27°NE;1号斜井大里程端D2K 11+700~D2K 12+045段隧道内岩层产状为N65°E/45°SE、N65°E/75°NW,地表近水平。由附近地质、隧道内开挖揭示及钻探分析结果可知,岩体受区域构造影响严重,倾角3°~7°、15°~25°、26°~50°均有,隧道纵向、横向变化较大。

1.5.2 水文地质特征

宝峰隧道岩体原生节理、构造裂隙及风化裂隙发育,面裂隙率3%~10%,密集均匀、短小,发育程度随深度增加而减弱。浅部含水层均匀、连通性及透水性一般,多为泥质半充填,富水性中等;构造发育、补给条件好的地段富水性较强;区内主要接受大气降水补给。

施工中掌子面有0.1~8 L/s的地下水流出。由各钻孔的地下水稳定水位分析可知,稳定地下水位高程为1 975.1~1 980.05 m,平均1 977.58 m。隧道轨面高程为1 928.87 m,地下水位高于轨面约48.71 m,地下水压力约0.5 MPa,水压较大。

2 全风化粉细砂岩试验

2.1 原位测试

全风化粉细砂岩层标准贯入试验锤击数为64~84,平均锤击数为80.6,为密实状,变形模量25~40 MPa。动力触探试验修正锤击数为13.5~16.6,平

均锤击数为14.6,为密实状,孔隙比小于0.7。

2.2 渗透系数测试

经注水试验,渗透系数为 $0.1 \sim 0.5 \text{ m/d}$ ($1.16 \times 10^{-4} \sim 5.8 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$),地下水影响半径为 $10 \sim 20 \text{ m}$ 。

2.3 颗分试验

隧道内取样进行室内试验为:细砂及粉砂,黏粒含量 $0 \sim 0.7\%$,不均匀系数为2.17。第一组: $0.5 \sim 0.25 \text{ mm}$,占1.4%, $0.25 \sim 0.075 \text{ mm}$,占91.1%, $0.075 \sim 0.005 \text{ mm}$,占6.8%,黏粒含量占0.7%,不均匀系数为2.17,判定为细砂;第二组: $0.5 \sim 0.25 \text{ mm}$,占2.4%, $0.25 \sim 0.075 \text{ mm}$,占57.0%, $0.075 \sim 0.005 \text{ mm}$,占40.6%,判定为粉砂。

2.4 岩石物理力学试验

全风化砂岩层饱和重度为 $19 \sim 20 \text{ kN/m}^3$,地基基床系数为 $(1 \sim 2.5) \times 10^{-4} \text{ kN/m}^3$,压缩模量为 $9 \sim 19 \text{ MPa}$,变形模量为 $12 \sim 28 \text{ MPa}$,弹性抗力系数为 $30 \sim 45 \text{ MN/m}^3$ 。

2.5 全风化粉细砂岩的工程特性

全风化粉细砂岩富含地下水,呈饱和状,不扰动时为密实状,承载力能满足隧道的要求。然而,一旦遇到施工开挖扰动,粉细砂岩就呈流塑状开始发生流砂。多次流砂引起了地表大面积发生开裂、变形、沉降,形成地表塌坑,严重影响周围环境安全。

流砂现象产生的原因:砂子在地下跟水一起流动,地下水的水力坡度大(即动水压力大),且动水压力的方向与砂土的重力方向相反,砂土受水的浮力、动水压力的作用,有向上举的趋势。当动水压力等于或大于砂土的浸水密度时,砂土颗粒处于悬浮状态,发生流砂现象。

产生流砂现象的内因:当砂土的孔隙比小、含水量大、粘粒含量少、粉细粒多、渗透系数较小(与本隧道的全风化饱和状粉细砂岩的特性完全符合)、排水性能差时,容易产生流砂现象。因此,流砂现象极易发生在粉细砂中,但流砂发生与否还取决于地下水在土中渗流所产生的动水压力(渗流力)。

3 隧道主要工程地质问题分析

3.1 涌水涌(流)砂

(1)1号斜井在DK11+469上台阶准备开挖施工时,核心土右下侧发生开裂,裂缝中有泥砂缓慢流出,发生了涌水流砂,含砂量25%,总流砂量 20 m^3 。

(2)DK11+477处止浆墙拆除后,拱部下方1.5 m处形成直径0.6 m的溃口,从该口中缓慢流出粉细砂,持续时间较长,总流砂量 10 m^3 。

(3)1号斜井工区上台阶掌子面施工至DK11+443处,揭示地质为紫红色泥质、砂质板岩,薄层状,强风化,为相对隔水层;掌子面上台阶左拱脚(线右)发生流砂,水颜色为灰黄色,水量约 2 L/s ,含砂量约30%~40%。封堵墙完成后才堵住水,总涌水量(包含砂量)约 600 m^3 ,其中含砂量 240 m^3 。掌子面前方(昆玉高速公路下方)可能存在松散体或空腔,公路再次塌陷的风险极高。

(4)1号斜井DK11+443掌子面拱顶左侧0.5 m(线右)下方2 m处出现涌水流砂,在完成止浆墙浇筑后,泄水管才停止涌水流砂,安设球阀后关闭泄水管,洞内淤积的粉细砂约 260 m^3 。高速路玉溪方向水沟边(DK11+410)地表沉降12 cm,高速公路最外侧车道边路面沉降9 cm,路面有长2 m裂缝,缝宽8 mm,路边矮边墙和边坡存在明显下沉开裂现象。

(5)进口端在右中台阶施工至DK11+384顶部处发生涌水涌砂,水量最大时 8 L/s ,最小水量 4 L/s ,在完成止浆墙浇筑,一段时间后才停止涌水涌砂,总流砂量 1000 m^3 。

宝峰隧道DK11+380~+480段发生涌水流砂7次,水量最大时 8 L/s ,水量最小时 0.1 L/s ,总流砂量 2000 m^3 。由此引起昆玉高速公路地表大面积沉降、开裂、塌陷,高速公路临时封闭、改道,洞内外应急抢险、安全风险极高。

3.2 地表沉降变形

(1)宝峰隧道DK11+463右28 m处(昆玉高速公路K62+480附近玉溪方向右侧路堑脚至路堑坡位置)发现了呈“竖井”状的塌陷坑,直径5.3 m,深8 m,沉降量 180 m^3 ;四周岩壁近垂直,由上往下0~2 m为棕红色硬塑状粉质黏土,2~8 m为灰黄色全风化砂岩。

(2)DK11+411隧道中线左侧6.1 m处地表(昆玉高速公路玉溪方向K62+000处西侧路基边坡脚)出现塌陷坑,呈椭圆形,沿高速公路方向长20 m,垂直高速公路方向宽7 m,深1~2 m。

(3)昆玉高速玉溪方向水沟(DK11+415)沉降累计631 mm,高速路最外侧车道边路面沉降累计484 mm,中间车道路面沉降累计6 mm;最外侧车道中间路面出现长30 m的纵向裂缝,缝宽30 mm;右侧路堑顶外侧14 m处有2条环状裂缝,长3~8 m,缝宽30 mm,该裂缝距线路右侧高压铁塔距离仅19 m,沉降区继续扩大将威胁到220 kV高压输电线铁塔的安全。

4 隧道工程地质问题防治对策

综合地质超前预报是确保施工安全、合理确定支护措施及防排水等措施的基础。宝峰隧道内采用的超前预报手段主要为:综合物探超前探测(地质雷达、地震 CT)、水平钻孔(取芯钻孔)超前探测、洞内综合地质法。加强预报工作的成果分析及信息反馈,通过开挖后反复验证,不断提高预报水平及预报精度,做到防范于未然,预判险情超前处理,尽量避免事后处理所引发的安全问题,确保了掌子面的稳定。在前方存在险情的情形下,采取措施宁强勿弱,防涌防坍,确保施工安全^[5-6]。

4.1 涌水涌(流)砂防治

(1)DK 11+389~+469段(长80 m)为饱和状全风化粉细砂岩,围岩为Ⅵ级,自稳性极差。支护结构采用Ⅵ级抗水压衬砌,拱部180°范围设双层超前咬合旋喷桩配合108 mm超前大管棚,边墙设单层超前咬合旋喷桩,每循环长24 m(搭接5 m)全环 I25a 工字钢钢架,间距0.5 m,掌子面旋喷加固,三台阶临时仰拱法开挖,上中台阶的锁脚旋喷桩,基底粉细砂地段采用网格状咬合旋喷桩加固等处理措施^[7]。双层超前咬合旋喷桩实施的主要目的是形成相对密闭的“管帷幕”,阻止地下水的流动,减少流砂发生的几率,如图1所示。

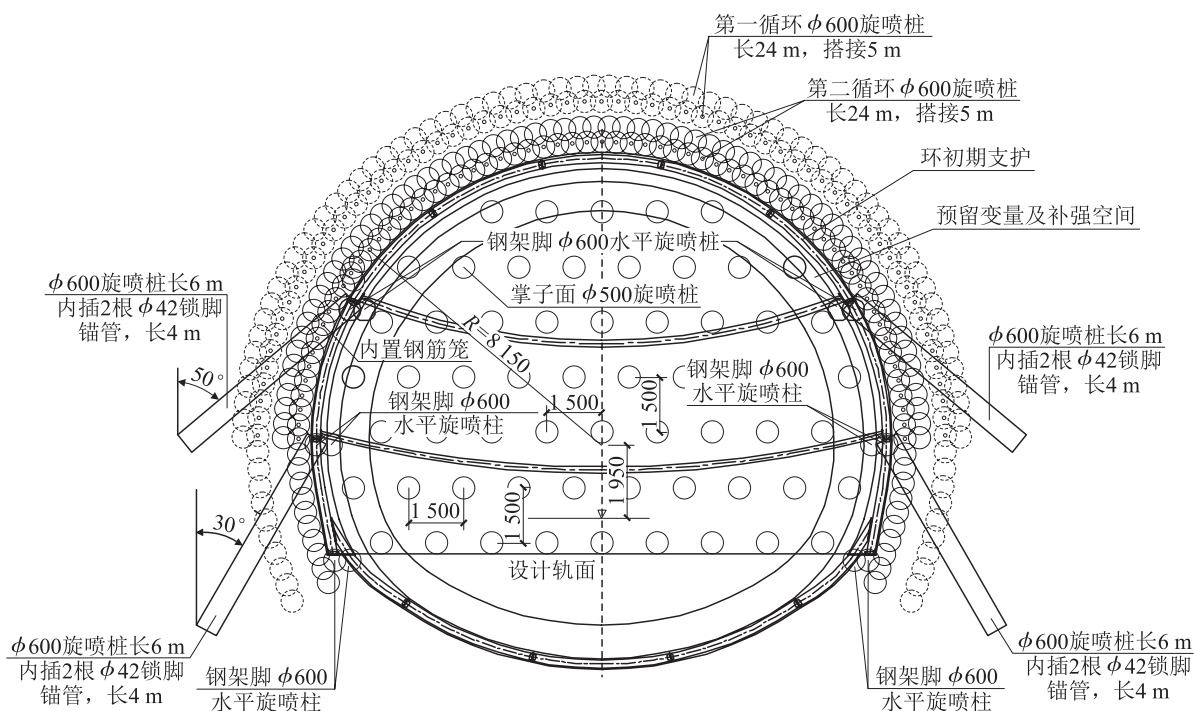


图1 拱墙旋喷咬合桩布置横断面图(mm)

(2)进口方向施作35m长的超前咬合旋喷桩(DK 11+385~+420段)和1号斜井昆阳端施作35m长的超前咬合旋喷桩(DK 11+411~+446段)对围岩进行加固,如图2所示。

4.2 地表沉降变形防治

隧道内涌水涌(流)砂引起昆玉高速公路地表大面积沉降、开裂、塌陷,造成了高速公路路面4次下沉,累计下沉量达840 mm,地质雷达探测显示路面下方有疑似空洞。

地表沉降区除了采用地质雷达探测外,局部地段还采用地震 CT。地震 CT 速度分布图显示探测区域内介质的弹性波速度为1 000~2 500 m/s,2条剖面的速度图上均存在向下延伸并分别倾向于SDZ-BF02-04

和SDZ-BF02-08孔的低速(1 000~1 900 m/s)异常,为坍塌松散堆积体;靠近SDZ-BF02-09孔的速度则稍高(1 900~2 500 m/s),存在团块状的区域,为软弱、破碎岩体的反映。判别地震 CT 速度分布断面图上部速度低于1 900 m/s的区域为坍塌松散堆积体(V),波速值大于1 900 m/s的区域为软弱、破碎岩体(IV)。2条地震 CT 剖面的速度图上均存在向下延伸并分别倾向于SDZ-BF02-04和SDZ-BF02-08孔的低速异常,为坍塌松散堆积体。

综上所述,本段高速公路与隧道掌子面间存在坍塌松散堆积体,以地表陷坑(DK 11+463右28 m)和隧道开挖到的掌子面(DK 11+387)为轴线,轴线左右各5 m为坍塌松散堆积体范围,总宽约10 m。轴线两

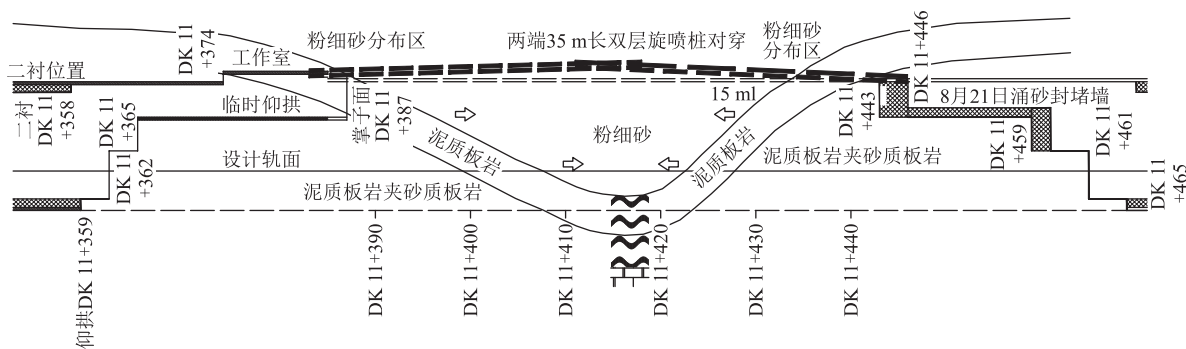


图2 旋喷桩方案图

端到高速公路两侧边沟,物质成分为全风化(W_4)粉细砂岩。

针对明显的地表沉降区及物探异常区域,采取地表注浆加固、高压铁塔基础加固、地表深井降水及修建临时便道绕行的安全辅助措施。

(1) 地表钻孔注浆加固措施

对沉降区、可能的空洞、松散区进行钻孔注浆加固。孔间距 2 m,孔深 12~67 m,跳孔施做,对全风化粉细砂岩地层,钻孔后放置钢花管以防塌孔。浆液采用纯水泥浆,配合比为 0.5:1~0.8:1,在可注的前提下尽量提供高浆液浓度,注浆压力控制在 0.3~0.5 Mpa。钻孔顺序:从沉降区边缘往中心区逐孔推进,灌注完成后用水泥砂浆封堵。对高速公路开裂、沉降、陷坑采取“探、灌”结合的方式处理。

(2) 地表高压铁塔基础加固

地表大面积沉降、开裂区域距高压铁塔仅 19 m,在铁塔与高速公路间采用竖向旋喷咬合桩加固高压铁塔基础,以降低高压铁塔沉降和倾斜风险。

(3) 地表深井降水

于 DK 11+410 隧道中线左侧 15 m 处及右侧 15 m 处、DK 11+420 处隧道中线右侧 15 m 处布置降水井进行降水,深度以超过砂层底部 5 m 或超过隧道底部 15 m 为宜,总深度 80~100 m。降水可有效减小地下水压,减小饱和砂土的流动性,提高强度。

(4) 地表修建便道绕行

宝峰隧道 DK 11+380~+480 段(长 100 m)施工时发生涌水涌(流)砂 7 次,总出砂量约 2 000 m^3 ;高速公路路堑脚发生过 2 次塌陷,多处开裂、变形、下沉,最大下沉量 840 mm。高速公路大面积沉降危及高速公路的运营安全,固采用便道绕行。

5 结论

以中老铁路宝峰隧道为研究背景,通过现场地质勘察、室内试验、物探等手段分析了全风化粉细砂岩

层的分布和地质灾害特征,得出主要结论如下:

(1)经综合勘察,查清了全风化粉细砂层的分布、特征及性质,全风化砂岩呈饱和砂土状,工程性质复杂,施工极易发生流砂及塌陷,施工风险极高。

(2)对施工图进行及时调整、完善和优化,有效控制安全风险。拱部 180° 范围设双层超前咬合旋喷桩配合 108 mm 超前大管棚,边墙设单层超前咬合旋喷桩;采取地表注浆加固,高压铁塔基础加固、地表深井降水及修建临时便道绕行的隧道施工安全辅助措施。

参考文献:

- [1] 铁道部第一勘察设计院. 铁路工程地质手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
The First Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Handbook of Railway Engineering Geology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [2] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S].
TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnels [S].
- [3] TB 10012-2019 铁路工程地质勘察规范[S].
TB 10012-2019 Code for Geology Investigation of Railway Engineering [S].
- [4] TB 10049-2014 铁路工程水文地质勘察规范[S].
TB 10049-2014 Code for Hydrogeological Investigation of Railway Engineering [S].
- [5] 赵勇. 隧道设计理论与方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
ZHAO Yong. Theory and Method of Tunnel Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [6] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
GUAN Baoshu. Key Points of Tunnel Engineering Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [7] 丰明海, 何振宁. 铁路隧道施工中围岩变形失稳工程地质问题[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 677-683.
FENG Minghai, HE Zhenning. Engineering Geological Problems of Deformation and Destabilization of Surrounding Rocks in Railway Tunnel Construction [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 677-683.