

文章编号: 1674—8247(2023)06—0106—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 06. 020

# 复杂环境隧道穿越强富水地层施工技术研究

罗远煜

(中铁十六局集团第四工程有限公司, 北京 101400)

**摘要:**太锡铁路和平隧道穿越断层破碎带,岩性接触带岩体破碎,侵入构造、断裂构造发育,围岩稳定性极差,且为强富水带,极易发生涌水突泥,施工安全风险高。为保证开挖进度和施工安全,穿越富水地层施工时,采用隧道地震勘探 TSP 及地质雷达等技术超前分析隧道围岩情况,为掌子面开挖提供技术及安全指导,采取超前引水措施,克服出水量大以及长斜井反坡排水等施工难题,实现洞内无水作业。穿越强富水地层隧道施工采用三台阶七步开挖法,该技术运用超前、径向堵水技术,有效地控制了围岩变形施工难题,为今后富水地段隧道施工提供了借鉴。

**关键词:**富水; 施工安全; 超前引水; 开挖; 围岩变形

**中图分类号:** U455. 4

**文献标志码:** A

## A Study on Construction Technology of Tunnel Crossing Strong Water-rich Stratum in the Complex Environment

LUO Yuanyu

(The Fourth Engineering Co., Ltd., of China Railway 16th Bureau Group Corporation Limited, Beijing 101400, China)

**Abstract:** Heping Tunnel of Taizicheng-Xilinhot Railway passes through the fault fracture zone. The rock mass in the lithological contact zone is broken, and the intrusive structure and fault structure are developed. The rock has extremely poor stability, and it is a strong water-rich zone, which is prone to water gushing and mud bursts, so the construction safety risk is high. To ensure excavation progress and construction safety while crossing water-rich strata, tunnel seismic exploration techniques such as TSP and geological radar were used to analyze the surrounding rock conditions in advance. This provided technical and safety guidance for tunnel face excavation and allowed for advanced diversion measures to be taken. These measures helped overcome construction difficulties, including dealing with large water yields and reverse slope drainage of long inclined shafts, and enabled waterless operations within the tunnel. The three-bench seven-step excavation method was adopted for the construction of tunnels crossing strong water-rich strata. This technology includes advanced and radial water plugging to effectively control the deformation of surrounding rock, which provides a reference for future tunnel construction in water-rich sections.

**Key words:** water-rich; construction safety; advanced diversion; excavation; surrounding rock deformation

随着铁路建设的跨越式发展和铁路施工技术的不断进步,隧道建设中常遇到各种复杂地质条件,其

中强富水地层的灾害尤为突出。目前,常采用超前钻探法、地质分析法来探测隧道围岩和地下水情况,各

收稿日期:2022-07-08

作者简介:罗远煜(1990-),男,工程师。

引文格式:罗远煜. 复杂环境隧道穿越强富水地层施工技术研究[J]. 高速铁路技术,2023,14(6):106-110.

LUO Yuanyu. A Study on Construction Technology of Tunnel Crossing Strong Water-rich Stratum in the Complex Environment [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6):106-110.

种方法都有其局限性;地震勘探 TSP 及地质雷达技术超前分析只能判断出掌子面前方含水地层位置,不能精确预报范围分布和空间位置。

和平隧道穿越富水地层施工段有众多安全隐患,极易产生突泥突水、塌方、支护结构变形等安全质量事故,地下岩隙水严重影响隧道施工,导致工期严重滞后。初支轻微渗水会影响喷锚混凝土效果,在岩层构造裂隙共同作用下地下水富集发育区易产生泉涌、突水等现象<sup>[1]</sup>。解决涌水突泥和控制围岩变形是隧道穿越含水地层时迫切需要解决的难题。施工中切断渗水路径的方法普遍采用地质预报和超前注浆导管。

然而,和平隧道凝灰岩和玄武岩风化程度存在差异较大且相互混杂,隧道涌水位置难以找到,注浆堵水效果未能达到预期。因此,隧道穿越富水地层时,施工处置措施须科学合理,且应提前做好超前地质预报<sup>[2]</sup>。

## 1 工程概况

太锡铁路和平隧道全长 8 944.26 m,于 DK 58+280~+380 段下穿崇礼区转枝莲至万龙二级公路红花梁隧道,结构净距 23.73 m,如图 1 所示。和平隧道下穿繁忙既有线,施工环境极差,施工难度大、安全风险高,因此该隧道施工方法的选择尤为关键。

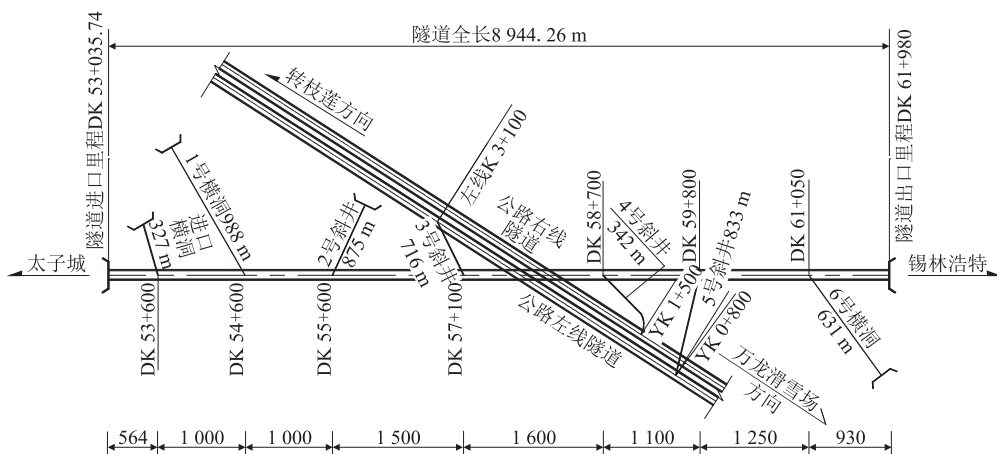


图1 和平隧道辅助坑道布置及与既有线平面图(m)

和平隧道最大埋深 468 m,地质构造复杂,Ⅳ级、Ⅴ级围岩占比大,共设 7 个斜井以增加正洞工作面,洞身穿越断层破碎带、岩性接触带地段容易发生塌方。围岩岩性较单一,主要以凝灰岩和玄武岩岩层为主,风化程度差异的玄武岩相互混杂、凝灰岩不均匀分布,隧道地质条件较差。岩隙水是和平隧道地下水主要来源,基岩裂隙尤为发育,裂隙水沿着节理裂隙流动,并连接地震影响带。当隧道掘进到地震影响带时,地下水汇集发生突水事故。该隧道掘进到富水地带时,掌子面最大日涌水量超过 1 万 m<sup>3</sup>,给施工带来很大困难。

## 2 技术处理方案

和平隧道地质构造错综复杂且地下水丰富,施工期经常发生突泥突水、支护结构变形、边墙移位、塌方等问题,隧道施工难度极大。治理隧道水害是保障施工的关键所在,水害治理采取防、排、堵措施<sup>[3]</sup>。和平隧道凝灰岩和玄武岩风化程度存在差异且相互混杂,隧道涌水位置难以找到。施工中查找涌水位置通

常需要依据地形地貌,提前做好超前地质预报、围岩素描、水平地质钻、超前炮孔钻探等措施,然后通过引流、封堵和注浆加固等措施加以处理<sup>[4]</sup>。

### 2.1 施工中预报

为掌握隧道前方地下水和地质分布情况,施工预报方案以 TSP203 预报为主,并辅助 30 m 超前钻探进行校核。隧道施工使用 TSP203 系统进行地震探测、超前钻孔、开挖面岩性推测等方法 and 手段来研判开挖面前方及四周围岩和水文地质情况,出现偏差及时对施工方案和支护参数予以调整。

### 2.2 地下水处治方案

#### (1) 工作面加固安全

和平隧道围岩为全风化玄武岩,稳定性极差,强富水冲刷掌子面易发生局部塌方。为确保隧道安全快速施工,处理涌水前再次加固处理已开挖支护 5 m 范围内围岩。开挖面渗水量小的部位采用喷浆封闭,紧靠开挖面钢架支护采用 2 榀间距 40 cm 工 18 工字钢支护,并在拱腰位置纵向按 2 m 间距布设工 18 工字钢横撑,开挖面后方 4 m 区域内的初支使用 4 m 长

$\phi 42$  mm 小导管注浆加固,注浆压力范围在 1.5~2 MPa,纵环向布置间距 0.5~0.6 m 的小导管用于排水。下导坑全风化玄武岩在流水浸透变软,及时施作仰拱以预防侧移边墙,对围岩进行监控量测,频率为次/6 h。

(2) 掌子面排水

隧道开挖面涌水量大部位通过增设开挖面后方引水避车洞排水和掌子面地质超前钻孔排水<sup>[5]</sup>。在隧道一侧开挖宽 6.9 m、高 4.8 m 的避车洞,在其侧壁上钻 6 个孔径 108 mm、间距 1 m 的引水孔,孔深越过上导坑掌子面 25~30 m。引水孔分两组,一组朝向上导坑涌水腔,角度以 5°~10°,另一组水平钻进。避车洞内 3 个水平孔流水成喷射状且流量较大,另外 3 个水平孔流量较小。引水洞分流了掌子面绝大部分水流,逐渐缓解了水压和水量。在下导坑左右侧各钻一个深度 30 m 的引水孔,下导坑引水孔钻完后涌水腔内的流量减少 3/4,水压又得到缓解。正掌子面片状裂隙水通过地质超前钻探全部被汇集到钻探孔内排出,掌子面大部分流水的排出得到解决后,可进入下道工序施工。

(3) 涌水腔引堵

开挖面涌水基本排出后,拱部不出现流水迹象,坍塌风险性低,此时涌水腔采取引流、封堵的方式处理,如图 2 所示。涌水腔按水流量大小划分成引水区域和堵水区域,引水区域钻 3 个  $\phi 108$  mm 引水孔,孔深均为 6 m,成孔后在孔内安放  $\phi 90$  mm 钢管进行引水,按 10 cm 间距、1.5 cm 孔径、尾部预留 1.0 m 不钻眼,梅花形布设钢管管壁钻进水眼,钢管端部安放  $\phi 110$  mm 橡胶软管将水排到下导坑水沟内,并使用  $\phi 22$  mm 的螺纹钢筋将 3 根钢管端部焊在一起。当钢管内流量变小后,用小块钢板焊接封堵出口,最后堵水区采用喷浆料封闭。

引水区施作完成后,采用长 5 m、间距 0.5 m 梅花形布置  $\phi 42$  mm 小导管进行堵水区域注浆处理,注浆眼孔径 5 mm,间距 15~20 cm。小导管每施作完一排,及时压注双液水泥浆对小导管四周密封处理,水泥浆和水玻璃混合浆液配制多个不同凝固时间的配合比,注浆时不同配合比的浆液选择需根据小导管内有无流水或流量大小来选择。作业到涌水腔部位时,小导管重复压力注浆控制在 1.5~2 MPa,浆液凝固时间控制在 10~20 s 之内,注浆量以注浆压力达到 2 MPa 或者其他小导管溢出浆液时停止<sup>[6]</sup>。

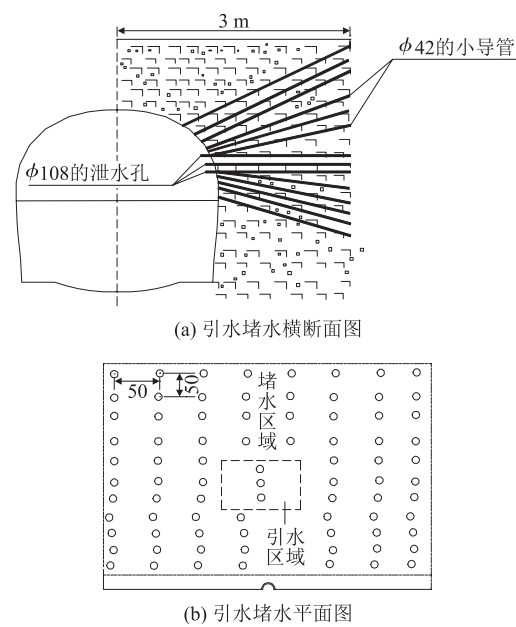


图2 涌水腔引流、封堵示意图(cm)

机械设备配备、施工现场管理等因素影响隧道的快速安全施工,其中尤为关键的因素是施工方案的选择。以新奥法理论为指引,土体加固和围岩限制应力重新分布采用超前管棚支护、钢拱支撑、挂网、打锚杆等措施,实施短开挖、快循环,土体扰动小,选择合适支护方式,确保工程质量和安全<sup>[7]</sup>。

3.1 开挖施工流程

和平隧道地下水水位较高,涌水量较大,为减少开挖过程中的围岩扰动,必须及时封闭成环。根据施工难度、安全、质量、工期及经济效益等综合考虑,采用三台阶七步开挖法工序,该工法循环次数少,开挖作业空间大,利于组织机械化施工和多作业面平行施工,效率高。开挖施工流程如图 3 所示。

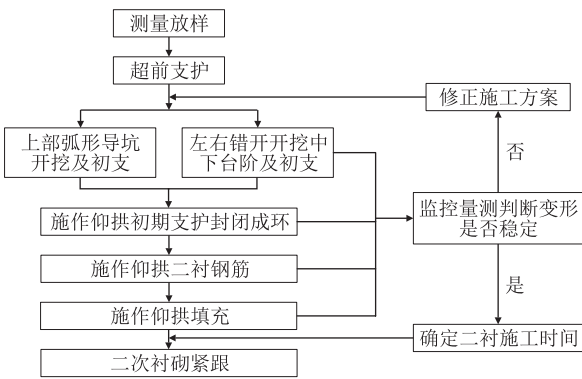


图3 开挖施工流程图

3 隧道掘进快速施工工艺

和平隧道的围岩地质情况、工人技术熟练程度、

3.2 施工工艺

(1) 开挖施工步骤



环形开挖第①步; 错开开挖②步、③步中、下台阶; ④步、⑤步中、下台阶错开开挖(③步、⑤步施作后用土回填); ⑥步开挖核心土; 开挖仰拱后⑦步、⑧步初支封闭成环(⑦步、⑧步初支成环后用土回填); 第⑨步开挖仰拱、二衬、填充(一次成型浇筑仰拱填充, 严禁留施工缝)施工, 开挖法步序如图 4 所示。

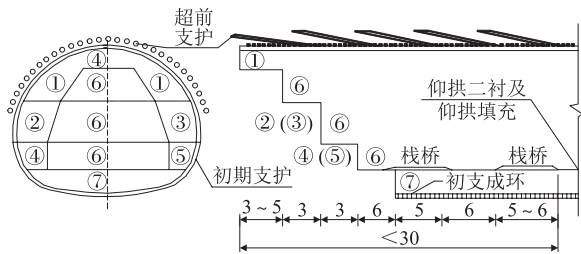


图 4 开挖施工步序图(m)

(2)操作要点

①超前支护

根据开挖轮廓线,在拱部 150° 范围内施打  $\phi 42\text{ mm}$  小导管超前支护,超前小导管外插角为  $10^\circ \sim 13^\circ$ , 环向按间隔每  $3\text{ m}$  根、长  $2.6\text{ m}$ 、搭接大于  $1.5\text{ m}$  长度方式布置。为增强支护效果,可将拱架腹部和小导管端部焊接在一起,钢管内水泥砂浆充填。

②开挖上部弧形导坑

拱部超前支护施作完成后开挖上部弧形导坑,上部弧形导坑用挖掘机环向开挖,依据初支钢架间距确定循环开挖进尺为  $0.75\text{ m}$ ,预留长  $3\text{ m}$ 、宽  $5\text{ m}$  的核心土,开挖后及时施作喷、锚、网系统支护、架设钢架,在钢拱架两侧边缘脚部高于  $25\text{ cm}$  施打 4 根下倾角  $25^\circ$  的锁脚锚管,并将钢架和锁脚锚管端部焊在一起。

③中台阶左、右侧错开开挖

依据初支钢架间距确定开挖进尺,初支采用两榀长  $1.5\text{ m}$  钢拱架,左、右侧错开  $2 \sim 3\text{ m}$  开挖台阶,开挖高度  $3.2\text{ m}$ ,开挖后及时施作喷、锚、网系统支护、接长钢架。在钢拱架两侧边缘脚部高于  $25\text{ cm}$  处,施打 4 根下倾角  $25^\circ$  的锁脚锚管,并将钢架和锁脚锚管端部焊在一起。

④下台阶左、右侧错开开挖

依据初支钢架间距确定开挖进尺,初支采用两榀长  $1.5\text{ m}$  钢拱架,左、右侧错开  $2\text{ m}$  开挖台阶,开挖高度  $2\text{ m}$ ,开挖后及时施作喷、锚、网系统支护、钢架接长,在钢拱架两侧边缘脚部高于  $25\text{ cm}$  处,施打 2 根下倾角  $25^\circ$  的锁脚锚管,并将钢架和锁脚锚管端部焊在一起。

⑤上、中、下台阶预留核心土

开挖进尺与各台阶循环进尺相同,预留的核心土分别开挖上、中、下台阶。

⑥仰拱开挖成环

仰拱开挖每次循环进尺控制在  $4\text{ m}$  以内,短距离跳槽开挖,跳槽间隔  $3\text{ m}$ ,次数小于 3 次。仰拱开挖后,对杂物、虚碴、泥浆、积水及时清除,并及时施作仰拱钢架,按设计厚度喷射混凝土,及时封闭初支成环,每次以  $9\text{ m}$  长度循环施作浇筑仰拱超前拱墙衬砌,混凝土一次浇筑成型,纵向不留施工缝。在仰拱混凝土填充浇筑前,须对仰拱表面杂物和积水进行处理,且需在仰拱混凝土终凝后一次连续浇筑成型,表面保持平整、排水畅通、不积水,坡度符合设计要求。

4 监控量测

为确保施工进度和安全,对围岩和隧道稳定状态进行监控,同时也为施工生产管理提供了技术及安全指导。和平隧道地质构造复杂,IV 级、V 级围岩占比大,围岩破碎不稳定,富水地带监控量测贯穿施工全过程<sup>[8]</sup>。

4.1 量测项目

依据隧道围岩支护样式和施工方法确定监控量测项目,如表 1 所示。

表 1 监控量测项目表

监测项目	测试方法和仪表	测试精度/mm	备注
衬砌前净空变化	收敛计、全站仪	0.1	水平收敛量测
拱顶下沉	水准测量的方法,水准仪、钢尺	1.00	-
二次衬砌后净空变化	收敛计	0.01	水平收敛量测

4.2 量测断面布置

隧道每个量测断面上布置 1 个拱顶下沉测点和 2 条水平净空收敛量测基线,如图 5 所示。

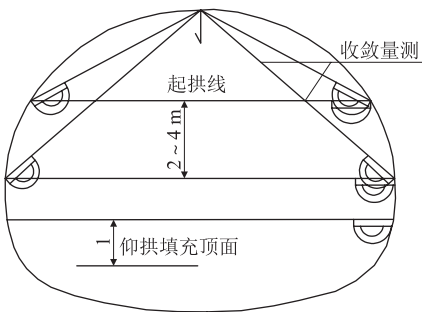


图 5 监控量测测点布置图

4.3 量测频率

量测的频率依据变形速率进行调节,如表 2 所示。

表 2 监控量测频率表		
量测频率	变形速率/(mm/d)	开挖面距量测断面距离/m
2 次/d	≥ 6	< 1 B
1 次/d	1 ~ 6	1 ~ 2 B
1 次/2 ~ 3 d	0.6 ~ 1	2 ~ 5 B
1 次/3 d	0.3 ~ 0.6	
1 次/周	< 0.3	> 5 B

注: B 为隧道的开挖宽度

4.4 数据分析

以和平隧道 DK 57 + 300、DK 57 + 260、DK 57 + 220 为例进行监测数据分析, 监控点数据对比如表 3 所示。量测数据对比分析表明, 和平隧道穿越断层破碎带及富水地段超前支护和初期支护的效果显著、结构稳定<sup>[9]</sup>。

表 3 各监控点数据对比表				
监测点		DK 57 + 300	DK 57 + 260	DK 57 + 220
拱顶	总收敛平均值	6.4	15.33	26.31
	最大总收敛速率平均值	0.55	2.45	4.5
拱脚	总收敛平均值	2.69	4.42	6.44
	最大总收敛速率平均值	0.42	0.52	0.75
侧墙	总收敛平均值	0.67	1.74	2.26
	最大总收敛速率平均值	0.24	0.28	0.43

5 结论

和平隧道地质构造复杂, IV 级、V 级围岩占比大, 围岩破碎不稳定, 施工处于富水地带、日最大涌水量超过 1 万 m<sup>3</sup>, 涌水量较大, 开挖过程为减少围岩扰动, 须及时封闭成环。为解决涌水突泥难题, 在充分做好地表和超前地质预报前提下, 对开挖面和开挖面后方集中涌水部位同时采取了超前引水措施, 实现了无水作业; 开挖方案采取三台阶七步开挖法, 成功解决了隧道涌水突泥和围岩变形施工技术难题, 实现了安全、优质、快速施工。

该施工方法工序循环作业少, 开挖作业空间大, 利于组织机械化施工, 多作业面平行施工, 可以做到快速施工, 缩短了拱架成环时间, 施工安全性好, 开挖进尺短, 机械化作业加速掘进进度, 缩短了围岩裸露时间, 有效地控制了围岩松弛变形。该方法在本项目的成功应用为类似隧道的施工提供了借鉴。

参考文献:

[1] 朱建国. 泥砂岩富水隧道基岩裂隙水治理关键技术研究与应用[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 1140-1146.

ZHU Jianguo. Key Technologies for Treatment of Bedrock Fissure Water in Muddy Sandstone Water Rich Tunnel Research and Application [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 1140-1146.

[2] 董晋. 复杂地质富水隧道综合超前地质预报技术研究[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(5): 634-641.

DONG Jin. Application of Comprehensive Advanced Geological Prediction in Advanced Detection of Water-bearing Geological Structures in Complex Tunnels [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(5): 634-641.

[3] 邓勇. 山岭铁路隧道施工地下水灾害及治理技术[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(6): 77-81.

DENG Yong. Groundwater Disaster and Control Technology in the Construction of Mountain Railway Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 77-81.

[4] 张付军, 胡俊, 段宇, 等. 某富水断层隧道涌水治理方案优化分析及工程应用[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 122-131.

ZHANG Fujun, HU Jun, DUAN Yu, et al. Optimization and Application of the Treatment Schemes for Water Inrush in a Water-rich Tunnel in Fault Zones [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 122-131.

[5] 吴少伟, 熊俊杰. 山岭隧道富水段施工排水技术[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(1): 57-60.

WU Shaowei, XIONG Junjie. Construction Drainage Technology of Rich Water Section in Mountain Tunnel [J]. Building Technique Development, 2022, 49(1): 57-60.

[6] 李善明, 朱志敬, 马全武, 等. 富水裂隙岩体注浆工艺及参数现场试验研究[J]. 建井技术, 2022, 43(2): 46-52, 32.

LI Shanming, ZHU Zhijing, MA Quanwu, et al. Research and Site Trial on Grouting Technological Parameters of Watery Cracked Rock Masses [J]. Mine Construction Technology, 2022, 43(2): 46-52, 32.

[7] 崔光耀, 朱建伟, 姜冲, 等. 富水岩溶大断面铁路隧道超前支护加固方案研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(1): 27-31.

CUI Guangyao, ZHU Jianwei, JIANG Chong, et al. Study on Reinforcement Scheme of Advanced Support for Large Cross-section Railway Tunnel with Water-rich Karst [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 27-31.

[8] 王琳, 杨林, 袁青, 等. 浅埋富水隧道施工大变形原因分析与应对措施[J]. 人民长江, 2022, 53(5): 162-167.

WANG Lin, YANG Lin, YUAN Qing, et al. Cause Analysis and Countermeasures of Large Deformation Induced by Shallow-buried Tunnel Construction under Water-rich Condition [J]. Yangtze River, 2022, 53(5): 162-167.

[9] 马栋, 闫肃, 王武现. 赣深高铁龙南隧道大型富水断层破碎带施工技术[J]. 隧道建设(中英文), 2020(11): 1634-1641.

MA Dong, YAN Su, WANG Wuxian. Construction Technology of Large-scale Water-rich Fault and Fractured Zone in Longnan Tunnel on Jiangxi-Shenzhen High-speed Railway [J]. Tunnel Construction, 2020(11): 1634-1641.