

# Construction Technology of High-Speed Railway Tunnel Underneath the Shallow-Buried Section of the River

Peng Liu

Xi'an-Chengdu Railway Passenger Dedicated Line Shaanxi Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710043, China

## Abstract

Shigushan tunnel of Baotou Lanzhou passenger dedicated line passes under Yinxiang River and Zhangjiagou river, due to shallow buried depth and poor geological conditions, it is easy to cause excavation difficulties and river leakage, the key point of the construction scheme is to ensure safe excavation and prevent surface settlement and river leakage at the same time. The tunnel excavation is carried out smoothly by means of changing the river channel, strengthening the highway retaining wall, and strengthening the surface at the bottom of the river, then the three-step seven-step excavation method, monitoring measurement in the tunnel and surface settlement observation are combined. The successful crossing of the bottom section of Yinxiang River and Zhangjiagou River not only ensures the construction safety but also reduces the construction cost, which can provide reference for the construction of similar projects.

## Keywords

underpass; relocate the river; surface treatment; monitoring and measurement

# 高铁隧道下穿河流浅埋段施工技术

刘鹏

西成铁路客运专线陕西有限责任公司, 中国·陕西 西安 710043

## 摘要

宝兰客专石鼓山隧道下穿茵香河、张家沟段, 由于埋深浅、地质条件差, 容易导致开挖困难和河水渗漏, 施工方案的重点是保证安全开挖的同时防止地表沉降和河水渗漏。通过改移河道、加固公路挡墙、进行河底地表加固处理等措施保证了隧道开挖的顺利进行, 然后采用三台阶七步开挖法、洞内监控量测和地表沉降观测相结合, 成功地穿过茵香河、张家沟底段, 既确保了施工安全又降低了施工成本, 可为类似工程施工提供参考。

## 关键词

下穿; 改移河道; 地表处理; 监控量测

## 1 引言

铁路隧道需要下穿河流时, 施工难度和安全风险很大。一方面, 如何防止河流水下渗, 避免施工作业面发生突泥突水等工程灾害; 另一方面, 隧道开挖施工将不可避免导致地层变形, 当变形过大时将危及地表建筑物的安全和正常运营。因此, 如何采取有效的措施和科学的手段来保证施工环境和周围环境的安全, 是此类隧道施工亟待解决的实际难题。

**【作者简介】**刘鹏(1985-), 中国陕西西安人, 本科学历, 工程师, 现任职于西安至成都铁路客运专线陕西公司, 从事铁路桥隧施工方面的研究。

## 2 工程概况

石鼓山隧道位于宝鸡市渭滨区渭河南岸, 起讫里程 DK639+430~DK643+760, 全长 4330m, 双线隧道。进出口均紧邻乡镇公路, 交通条件较为便利。洞身下穿茵香河、张家沟、刘家河三条较大沟谷, 最大埋深 133m, 最小埋深 3m。洞身除 DK640+790.559~DK641+455.754 位于直线上, 进出口段分别位于半径 R=8000m、8004.6m 的曲线上。洞身纵坡依次为 3/1720m、5.3/1200m、20/1410m。

结合隧道所处地形、地质条件, 考虑施工工期、救援疏散等要求, 采用 2 座无轨运输斜井辅助施工。其中, 该隧道经评估为高风险隧道, 是宝兰客专重点控制性工程之一。

### 3 安全风险

隧道多次穿越均有常年流水的浅埋沟谷，沟谷内地表水发育，隧道洞身处于第四系底层与第三系底层接触面附近，局部处于强风化的第三系砂岩及泥岩、砾岩层中，该隧道整体地质条件较差。

DK639+930~DK639+280、DK640+825~DK641+025、DK641+970~DK642+470段分别下穿茵香河、张家沟、刘家河，该三条河流均为常年流水，隧道最小埋深3m，施工中容易发生塌方、大变形、突水（泥）等风险事件。

### 4 针对工程风险采取的技术措施

#### 4.1 茵香河浅埋段

##### 4.1.1 地质情况

石鼓山隧道 DK639+950 ~ DK640+070 段，下穿浅埋冲沟，最浅埋深 8m，上部沟谷富水，地表水及地下水发育，隧道洞身通过地层主要为第四系中更新统（Q2）洪积粉质黏土、中粗砂、砾砂、细圆砾土、粗圆砾土，地下水渗透性较强。该浅埋沟谷段地表水为茵香河，属常年流水，百年一遇洪水流量 287.5m<sup>3</sup>/s。

##### 4.1.2 变更原因

由于地方政府对茵香河重新规划，将石鼓山隧道下穿茵香河段设为影视基地及文化旅游风景区，拓宽河道并在下游修建蓄水坝用以抬高水位，增加了隧道范围内地下水的补给源，加大了隧道施工及后期运营风险。另外，该段隧道埋深较浅，拱顶以上为粉质粘土、粗圆砾土、砾砂等，施工过程中突泥、突水的安全风险较大<sup>[1]</sup>。根据以上情况，结合茵香河浅埋地段的地形、地质条件及现场施工实际情况，2015年2月，由建设单位组织召开专家论证会，经讨论后，形成了对该段采用地表旋喷及袖阀管注浆加固相结合的处理方案。

##### 4.1.3 变更设计方案

###### (1) 地表加固方案

DK639+950~DK640+010 长 60m 地表采用 φ800 旋喷桩进行加固。旋喷加固范围为拱墙开挖轮廓线外 1.1m，旋喷桩桩底至仰拱最低面。旋喷桩桩长 25~30m。最外侧两排旋喷桩为咬合桩，桩间距纵向 0.7m，横向间距 0.6m，梅花形布置。其余隧道范围内的旋喷桩间距均按 1.2m×1.2m 布置。旋喷浆液采用单液浆进行施工，注浆压力不小于 20Mpa<sup>[2]</sup>。（见图 1）

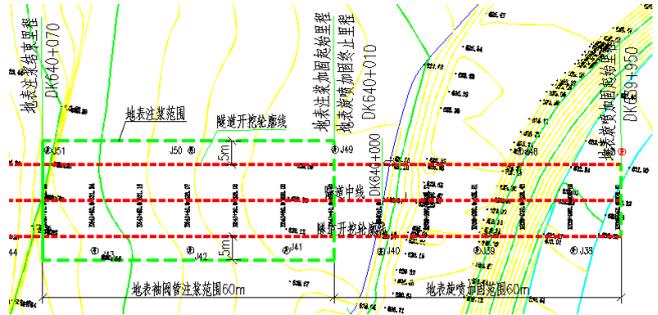


图 1 茵香河浅埋段地表加固平面图

DK640+010~DK640+070，长 60m 地表采用袖阀管分段注浆工艺，注浆固结地层，封堵地下水。袖阀管注浆孔孔深 25m~30m，采用 φ50×5 PVC 袖阀管和双向皮碗式止浆塞和 φ25 镀锌钢管做芯管分段进行注浆。注浆范围为拱墙开挖轮廓线外 5m，仰拱以下除进入泥岩或砾岩不小于 1m 之外，其余均为 3m。注浆钻孔直径 φ100mm，钻孔间距 1.5m，浆液扩散半径为 100cm。注浆材料第 1 排、第 2 排、第 18 排、第 19 排及两个端头处两排孔采用普通水泥-水玻璃双液浆，其余孔采用水泥单液浆为主。（见图 2）

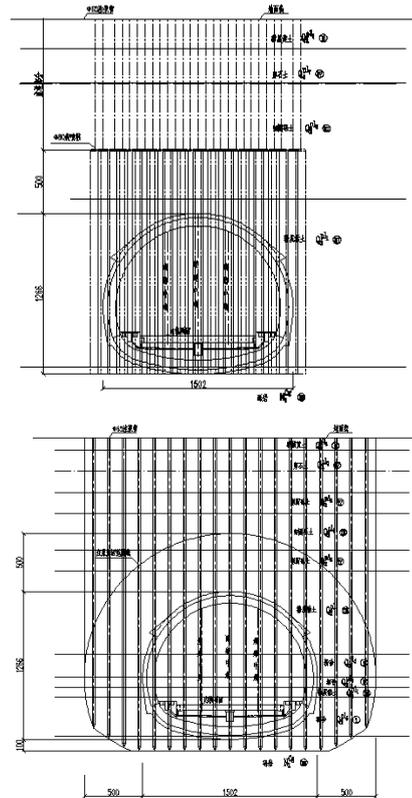


图 2 旋喷注浆及袖阀管注浆加固设计图

###### (2) 洞内措施

拱部双层 φ42 超前小导管超前注单液浆。初支钢架采用工 25a 型钢，间距 0.5m，喷射 C25 混凝土，厚度 35cm；拱墙

设置锚杆，锚杆长度 4m，间距  $1.0 \times 1.0\text{m}$ ，拱墙设置  $\phi 8$  钢筋网，网格间距  $20 \times 20\text{cm}$ 。二次衬砌采用 C35 钢筋混凝土衬砌，拱墙厚度 65cm，仰拱厚度 75cm。采用 CRD 法施工。DK639+950~DK640+070 段采用全包防水设计，全环设 2mm 厚防水板，板后铺设无纺布。防水板内侧沿纵向设  $\phi 80$  透水盲管；环向设  $\phi 50\text{HDPE}$  双壁打孔波纹管，环向盲管间距 6m，以排泄透过防水板的可能渗漏水。

(3) 配合注浆进行地形平整

DK639+950~DK640+070 段浅埋下穿茵香河，地形平缓，为方便注浆作业，根据地形条件对冲沟内进行相应平整。

(4) 设置钢筋混凝土底板

注浆完成后沿沟心设置厚度 30cm 的 C25 钢筋混凝土底板，表层设  $\phi 12$  钢筋网，间距  $20 \times 20\text{cm}$ ；设置范围为线路左侧 37.5m，右侧 27.5m。

(5) 做好引排措施

本段地表注浆应在枯水季节施工，施工期间做好地表水的临时引排措施，确保施工安全及质量。

(6) 做好地质预报

加强该段的超前地质预报，在每个注浆段落开挖剩余 10m 时进行水平钻探，探明前方的水量及注浆效果。

## 4.2 张家沟浅埋段

### 4.2.1 地质情况

张家沟浅埋段 (DK640+850~DK640+965) 设计为 VI 级围岩，分布的地层岩性主要为第四系全新统人工杂填土、黏质黄土、砂类土及碎石类土；上更新统风积黏质黄土；中更新统洪积粉质黏土、砂类土及碎石类土；下伏上第三系泥岩。

地表水勘察阶段张家沟地表水流量约  $1700\text{m}^3/\text{d}$ ，为常年流水。至施工阶段由于沟内人为回填垃圾，沟道已被阻断，沟内多为积水。地下水类型主要为第四系松散层孔隙潜水，主要接受大气降水和沟内地表水的侧向补给，含水层为细、粗圆砾土及中、细砂，富水性较好，地下水位埋深约 14~20m。可能出现的最大涌水量约  $6711\text{m}^3/\text{d}$ 。

### 4.2.2 变更原因

张家沟浅埋段地方政府进行了重新规划，对沟内进行了人工回填，回填厚度约 15~30m，成分混杂，主要为砖块、碎石、砼块、建筑垃圾等，土质不均。目前为张家沟工业园区，该段埋深较浅且地质情况复杂，施工开挖过程中风险较

大。另外石鼓山隧道下穿张家沟段埋深较浅，隧道拱顶以上为砂类土，施工过程中突泥、突水的安全风险较大。为加快施工进度，由建设单位组织召开专家论证会，根据专家意见，对张家沟浅埋段采用地表旋喷注浆加固方案。

### 4.2.3 变更设计方案

(1) 地表加固

① DK640+850 ~ DK640+965，长 115m 地表采用  $\phi 600$  旋喷桩进行加固，固结地层，封堵地下水，旋喷桩桩长 30m~35m。(见图 3)

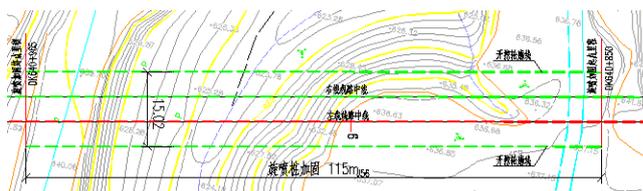


图 3 张家沟浅埋段地表注浆加固平面图

②加固范围为拱顶以上 5m 至隧道仰拱最低点 (旋喷桩底端位于砂层时旋喷至砂层与泥岩分界面)。最外侧一排桩采用咬合结构，旋喷桩纵向间距 0.5m，其余均按  $1.2 \times 1.2\text{m}$  梅花形布置。

③注浆采用注单液浆，注浆压力不小于 20Mpa。

(2) 洞内措施 (DK640+850~DK640+965 段)

①拱部设置双层  $\phi 42$  小导管超前注单液浆。

②初支钢架采用工 25a 型钢，间距 0.5m，喷射 C25 混凝土厚度 35cm；拱墙设置锚杆，锚杆长度 4m，间距  $1.0 \times 1.0\text{m}$ ，拱墙设置  $\phi 8$  钢筋网，网格间距  $20 \times 20\text{cm}$ 。

③二次衬砌采用 C35 钢筋混凝土衬砌，拱墙厚度 65cm，仰拱厚度 75cm。

④ CRD 法施工。(见图 4)

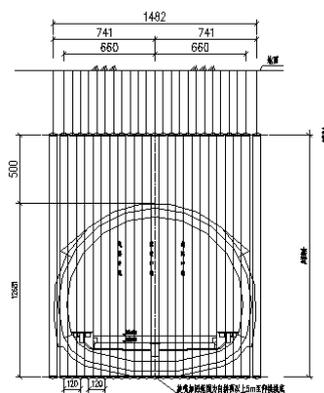


图 4 张家沟浅埋段旋喷注浆加固设计图

⑤ DK640+850~DK640+965 段采用全包防水设计，全环

设 2mm 厚防水板, 板后铺设无纺布。防水板内侧沿纵向设  $\phi 80$  透水盲管; 环向设  $\phi 50$ HDPE 双壁打孔波纹管, 环向盲管间距 6m, 以排泄透过防水板的可能渗漏水。

(3) 配合注浆进行地形平整

DK640+850~DK640+965 段浅埋下穿张家沟, 地形平缓, 为方便注浆作业, 根据地形条件对冲沟内进行相应平整。

(4) 注浆后铺砌

注浆完成后沿沟心采用浆砌片石进行铺砌。

(5) 做好引排措施

本段地表注浆应在枯水季节施工, 施工期间做好地表水的临时引排措施, 确保施工安全及质量。

(6) 做好地质预报

加强该段的超前地质预报, 探明前方的水量及注浆加固效果。

## 5 茵香河、张家沟浅埋段施工措施

### 5.1 洞内施工措施

#### 5.1.1 超前支护

洞内拱部设置  $\phi 89$  管棚 +  $\phi 42$  超前小导管注单液浆, 根据地表加固评估结论和洞内超前水平钻探情况, 局部采用洞内超前预注浆加固补强。

#### 5.1.2 开挖工法

原设计工法采用双侧壁导坑法或 CRD 法, 通过围岩加固后, 采用优化的三台阶临时仰拱法施工, 上台阶留置 2m 左右的核心土, 核心土后方的上台阶及中台阶设置临时仰拱。开挖横断面及纵断面图如下图。(见图 5、图 6)

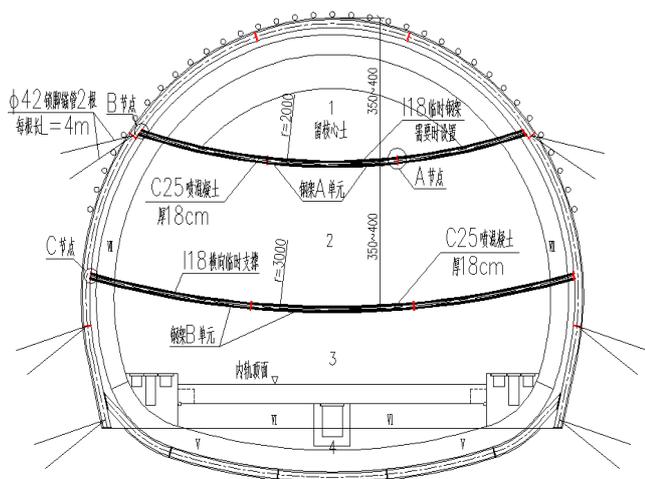


图 5 三台阶临时仰拱法工序横断面示意图

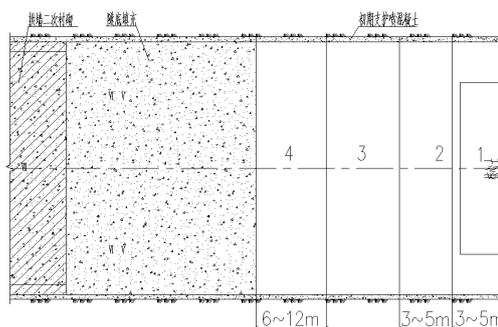


图 6 三台阶临时仰拱法工序纵断面示意图

#### 5.1.3 初期支护、二衬

初支钢架采用 I25a 型钢, 间距 0.5m, C25 喷射混凝土厚度 35cm, 衬砌类型采用 VI - III 型。

根据石鼓山隧道风险特点, 以安全为原则, 响应紧衬砌的要求, 石鼓山隧道仰拱安全步距按 30m 控制, 二衬安全步距按 60m 控制。施工过程中采用重要构件工厂化生产、衬砌钢筋卡具、二衬刚端模、仰拱弧形模板等手段控制施工质量。

#### 5.1.4 防排水

DK639+965 ~ DK640+085 段采用全包防水设计, 环向盲管间距 6m。小边墙中埋式止水带安装使用特制钢筋卡定位; 衬砌端头用两根角钢将每根止水带夹在中间, 两根角钢用卡子螺栓连接, 保证止水带顺直; 防水板采用热熔焊接<sup>[3]</sup>。

### 5.2 地表加固措施

#### 5.2.1 茵香河浅埋段地表加固

DK639+988 ~ DK640+025 长 37m 段地表采用  $\phi 800$  旋喷桩加固局部注浆补强, 加固范围为拱顶以上 5m 至仰拱最低点, 隧道两侧开挖轮廓线各设置 2 排纵向旋喷桩止水, 桩间距 70cm, 梅花形布置, 中部桩间距按 1.2m  $\times$  1.2m 梅花形布置。(见图 7)



引孔



旋喷

图7 旋喷桩施工作业

DK639+950~DK639+988 段和 DK640+025~DK640 +085 段长 98m 段地表采用袖阀管注浆固结地层，纵向宽度 25.02m 地表采用袖阀管分段注浆工艺，注浆范围为拱墙开挖轮廓线外 5m，仰拱以下 3m。注浆采用 L.SAC42.5 硫铝酸盐水泥。(见图 8)



钻孔作业



提升注浆芯管

图8 袖阀管注浆作业

### 5.2.2 张家沟浅埋段地表加固

DK640+850 ~ DK640+965 长 115m 地表采用  $\phi 600\text{mm}$

旋喷桩固结地层，加固范围为拱顶以上 5m 至隧道仰拱最低点，隧道两侧开挖轮廓线外各设置 2 排纵向旋喷桩止水，桩间距 50cm，梅花形布置。开挖轮廓线内桩间距按  $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$  梅花形布置。

考虑到旋喷桩加固的特点和张家沟浅埋地质复杂的特点，采用取芯法探测相应段落地层加固的薄弱区域与锁定，并对可能存在的渗水、地层软弱等不良地质因素展开攻坚加固，进而提高旋喷桩加固效果，并满足于工程开挖的要求。根据探测锁定结果 DK640+900~DK640+965 旋喷桩段采用地表袖阀管注浆补强加固，长度 65m，共计 114 孔，袖阀管补注浆孔设置在已完成的旋喷桩中间位置，横向间距 2.4m，纵向间距 3.6m，注浆采用 L.SAC42.5 硫铝酸盐水泥。

### 5.2.3 地表永久排水措施

注浆完成后沿沟心设置厚度 30cm 的 C25 钢筋混凝土底板，表层设  $\phi 12$  钢筋网，间距  $20 \times 20\text{cm}$ ，设置范围为线路左侧 37.5m，右侧 27.5m。

### 5.2.4 地表其他措施

施工前对浅埋段线路通过区域黄土陷穴、坑洞进行详细调查，对隧道施工及运营安全有影响的应回填密实，表层铺设三七灰土，严防地表水下渗。

茵香河跨线路段通过钢管排水，钢管上、下游管口附近水流渠化并底部铺设防水板，防止河水下渗。在洞内二衬通过后及时施作地表永久排水体系。

地表公路实行交通限制，24h 专人值班，禁止重型车辆通过隧道顶部。交通限制期限为洞内掌子面距公路 10m 至二衬施工通过公路。

## 6 取得的经验

石鼓山隧道茵香河、张家沟两条常年流水河沟。隧道埋深浅，洞身通过第四系的黏质黄土、粉质粘土、砂类土、碎石类土，第三系的泥岩、砂岩、砾岩等，地层杂乱，地下水发育，工程地质及水文地质条件复杂，施工难度极大，安全风险极高。

采用进行地表旋喷桩或袖阀管注浆加固后洞内三台阶临时仰拱法开挖的工艺性试验的方式。试验段过程严格以“地表加固一段、评估一段、洞内开挖一段、支护一段、总结一段”为原则，紧紧围绕过程受控、取芯受控、水量受控、变形受控四个方面综合评价掌子面安全情况，同时试验过程中按照

“探测锁定、加固验证、局部处置、强化监控”的原则对地表袖阀管（旋喷桩）注浆加固薄弱处（盲区）进行动态设计。

洞内采用三台阶临时仰拱法掘进过程中，通过材料检验、施工记录、注浆情况分析、钻孔取芯、洞内验证等注浆效果保证和验证手段，通过开挖过程中监控量测、工效分析及两个浅埋段进行综合评估。

（1）通过浅埋段地表袖阀管注浆、旋喷桩加固和开挖后洞内验证，注浆参数和工艺可指导施工，注浆加固效果良好，可以达到加固围岩、提高自稳能力的目的，可在类似工程推广应用。

（2）采用三台阶临时仰拱法开挖过程中采取了超前管棚+超前小导管、纵向角钢连接、上中台阶均设置临时仰拱等技术措施和系统的管理措施，监控量测分析结果显示，围岩变形速率及累计变形值可控制在正常范围内，基本无预警，安全可控，可在类似工程推广应用。

（3）通过工效分析，浅埋段通过地表加固后采用三台阶临时仰拱法开挖，加快了施工进度，提高了工效，为实现工期目标提供了有利支持，可在类似工程推广应用。

（4）通过数月的精心组织，“高标准、高质量、高效率、零事故”的圆满穿越浅埋段。说明“地表加固一段、评估一段、洞内开挖一段、支护一段、总结一段”的试验原则是合理的，围绕“过程受控、取芯受控、水量受控、变形受控”的安全评估思想是全面的，处理薄弱区采用“探测锁定、加固验证、局部处置、强化监控”的原则是到位的。

石鼓山隧道茵香河、张家沟浅埋段的顺利通过，为软弱围岩隧道浅埋段安全快速施工总结出了有效的技术措施，积累了丰富的管理经验，为此类隧道的设计和施工提供了成功范例。

### 参考文献

- [1] 贾华强, 郭光旭. 宝兰客专石鼓山隧道下穿浅埋河谷施工技术 [J]. 中国铁路, 2020(12):126-132.
- [2] 郭光旭, 张鑫. 高速铁路含粗砾石砂土浅埋隧道下穿常年流水河谷施工技术 [J]. 河北交通教育, 2019(04):40-43+56.
- [3] 武斌. 沪昆客专下穿村庄及河流段浅埋隧道机械开挖施工技术 [J]. 铁道建筑技术, 2017(07):24.