

1 渭河隧道工程概论

1.1 工程概况

宝鸡至兰州客运专线，是国家铁路“四纵四横”快速客运网的重要组成部分，东端与西安至宝鸡客运专线相接，向东可直达中原及华北、华东地区，向西可连通青海、新疆，并通过兰州枢纽与包兰铁路、兰渝铁路衔接。是全国铁路网主骨架的重要组成部分，也是横贯西北地区与中、东部地区的客运主通道，主要承担西部地区（新疆、西藏、甘肃、青海）对外直通客流，兼顾通道沿线大中城市间的城际快速客流，是一条高标准、高密度、大能力的客运专线。宝鸡至兰州铁路客运专线的建成，有利于提高陇海、兰新铁路运输通道客货运能，加快国家确定的关中-天水经济圈、陇海-兰新经济带的经济社会发展，促进西北和华东地区经济交流及商贸往来；有利于推动西部欠发达地区加快全面小康社会建设进程，提高沿线广大人民群众的生产生活水平；更有利于充分发挥兰州新区作为国家向西开放的战略平台和在甘肃战略布局中的中心带动作用，发挥甘肃连接欧亚大陆桥的战略通道优势，进一步提升甘肃对外开放的形象和水平。

渭河隧道位于宝兰客运专线天水南站出站端，地处甘肃省天水市花牛镇至渭南镇境内，受滑坡和天水机场定向台影响，先后穿越藉河南岸的黄土梁峁区、藉河河谷区、藉河北山黄土梁峁区至渭河南岸（图 1.1）。渭河隧道全长 10 016 m，其中洞身位于“V”形坡地段长约 8.6 km，隧道洞身通过的地层主要为第四系全新统冲洪积黏质黄土、粉质黏土、卵砾石土，新近系泥岩、砂岩，寒武系片麻岩等。隧道近距离下穿藉河、天北高速公路、天水经济适用房小区、羲皇大道以及巨型滑坡等，地面建构物众多、复杂，隧道综合施工风险极高，施工难度极大。基于以上背景，结合工程施工开展科学研究，最终形成《复杂环境特长高铁隧道关键修建技术——以宝兰客专渭河隧道为

例》一书，希望可为今后类似工程的修建提供一定的帮助。

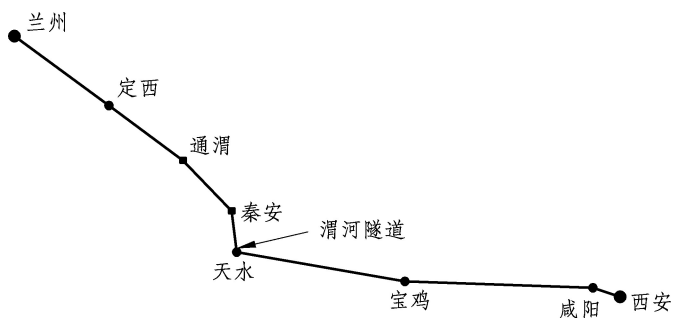


图 1.1 渭河隧道地理位置

1.2 地形地貌

渭河隧道先后穿越了藉河南岸的黄土梁峁区、藉河河谷区、藉河北山黄土梁峁区至渭河南岸。区内地形起伏较大，地面高程 1 500 ~ 1 120 m，高差约 300 ~ 380 m。隧道地形地貌类型划分详见表 1.1。

表 1.1 渭河隧道地形地貌类型划分表

序号	隧道里程	长度/m	地形地貌类型	备注
1	DK770+028~DK770+928	900	藉河南岸残留高阶地区	高出藉河河床约 50~60 m
2	DK770+928~DK772+700	1 772	藉河南岸黄土梁峁区	高出藉河河床约 150~200 m
3	DK772+700~DK773+150	550	罗家沟冲洪积扇堆积区	藉河河谷区
4	DK773+150~DK774+190	1 040	藉河一级阶地区	地表多为建筑物
5	DK774+190~DK775+620	1 043	藉河河床及漫滩区	常年流水
6	DK775+620~DK776+000	380	藉河一级阶地区	地表多为农田
7	DK776+000~DK780+041	2 041	藉河北山黄土梁峁区	含北山滑坡区

1.3 工程地质

1.3.1 地层岩性

渭河隧道先后下穿越了藉河河谷区及两岸黄土覆盖的低山区，区内地形起伏较大，高差约为 300~380 m，在 DK773+687 和 DK775+014 附近下穿羲皇大道和秦麦高速公路。渭河隧道洞身及浅埋段的地层主要为第四系全新统冲洪积黏质黄土、粉质黏土、碎石类土，第四系上更新统风积黏质黄土，新近系泥岩，寒武系片麻岩。

1. 第四系全新统 (Q₄)

(1) 滑坡堆积黏质黄土 (Q₄^{sl3}): 主要为藉河两岸及南河川滑坡体的物质成分，厚度 15~50 m 不等，淡黄色，土体疏松，土质不均匀，夹有第三系风化泥岩次生产物，硬塑~坚硬，局部软塑，Ⅱ级普通土。具Ⅲ~Ⅳ级湿陷性。

(2) 人工填土 (Q₄^{ml6}): 主要为道路路基填土和少量生活垃圾，灰黄色，褐黄色，以黏性土混砾石为主，土质不均，半坚硬~硬塑，Ⅱ级普通土。

(3) 黏质黄土 (Q₄^{al3}、Q₄^{pl3}): 分布于藉河两岸一级阶地的表层，厚度 1~5 m。浅黄色，土质均匀性较差，常夹薄层粉土及砂质黄土。软塑为主，局部硬塑，Ⅱ级普通土，Ⅴ级围岩， $\sigma_0 = 120$ kPa。

(4) 细圆砾土 (Q₄^{al6}): 主要分布于藉河河漫滩及一级阶地上部，浅灰色，青灰色，厚度 3~15 m，主要成分为片麻岩、砂岩、花岗岩等，粒径 60~20 mm 的约占 20%，20~2 mm 的约占 60%，其余为砂土充填，圆棱状，稍密~中密，潮湿~饱和，Ⅱ级普通土，Ⅴ级围岩， $\sigma_0 = 400$ kPa。

(5) 粗圆砾土 (Q₄^{al6}): 分布于藉河河漫滩及一级阶地中部，浅灰色，青灰色，厚度 2~12 m 不等，主要成分为片麻岩、石英岩、花岗岩等，磨圆度较好，呈圆棱状，粒径大于 60 mm 的约占 15%，60~20 mm 的约占 50%，20~2 mm 的约占 10%，其余为砂土充填。均匀性较差，局部夹细圆砾土及卵石土。稍密~中密，潮湿~饱和，Ⅲ级硬土，Ⅴ级围岩， $\sigma_0 = 500$ kPa。

2. 第四系上更新统 (Q₃)

(1) 风积黏质黄土 (Q₃^{col3}): 广泛分布于黄土梁峁顶部，浅黄~淡黄色，厚度 20~40 m，局部厚度可达 50 m，土质均一，颗粒以黏粒为主，土体较

疏松，垂直节理发育，虫孔及针状孔隙发育，表层含有植物根系，土体结构较紧密，坚硬~硬塑，Ⅱ级普通土，Ⅴ级围岩， $\sigma_0 = 150$ kPa。具Ⅲ~Ⅳ级湿陷性，对隧道进出口有一定影响。

(2) 粗圆砾土 (Q_3^{al6} 、 Q_3^{pl6}): 分布于罗家沟沟口黏质黄土层下，浅灰~青灰色，厚度 5~10 m 不等，主要成分为片麻岩、石英岩、花岗岩等，呈圆棱状，粒径大于 60 mm 的约占 10%，60~20 mm 的约占 50%，20~2 mm 的约占 15%，其余为砂土充填。均匀性较差，局部夹薄层或透镜状细圆砾土及卵石土。稍密~中密，潮湿~饱和，Ⅲ级硬土，Ⅴ级围岩， $\sigma_0 = 500$ kPa。

3. 第四系中更新统 (Q_2)

风积黏质黄土 (Q_2^{eol3}): 主要分布于黄土梁峁顶部，浅黄~灰黄色，厚度 10~30 m，土质均一，颗粒以黏粒为主，偶见僵石，土体结构密实，硬塑，潮湿，Ⅲ级硬土，Ⅳ~Ⅴ级围岩， $\sigma_0 = 200$ kPa。

4. 新近系 (N_1)

(1) 泥岩 (N_1^{Ms}): 棕红色、褐色、浅灰色，成分以黏土矿物为主，泥质结构，层状构造，节理裂隙发育，成岩作用差，岩质较软弱，遇水易软化，强风化厚 10~20 m，Ⅲ级硬土，Ⅴ级围岩， $\sigma_0 = 300$ kPa，弱风化，Ⅳ级软石，Ⅴ~Ⅳ级围岩， $\sigma_0 = 400$ kPa，具弱膨胀性。

(2) 砂岩 (N_1^{Ss}): 仅在羲皇大道和秦麦高速公路之间 (DK774+190~+900) 的藉河右岸一级阶地基底泥岩中有钻孔揭示到砂岩，呈薄层状及透镜状分布，钻孔揭露厚度 1.7~4.7 m，青灰色，砂质结构，含少量泥质，胶结及成岩作用差，岩心呈散状，Ⅳ级软石，Ⅴ~Ⅵ级围岩， $\sigma_0 = 450$ kPa。

5. 寒武系 (ϵ)

(1) 片麻岩 (ϵ^{Gn}): 经钻孔揭示仅在藉河北山分布，下伏于第四系全新统和上第三系泥岩之下。深灰~灰白色，变晶结构，片麻状构造，成分为石英、长石、云母等，岩体较为完整，局部受构造影响节理裂隙发育，岩体较破碎，Ⅲ~Ⅳ级围岩为主，岩体全~强风化层厚 10~20 m，Ⅳ级软石， $\sigma_0 = 500$ kPa；弱风化，Ⅴ级次坚石， $\sigma_0 = 800$ kPa。

(2) 大理岩 (ϵ^{Mb}): 下伏于第四系全新统和上第三系泥岩之下, 亮白色, 变晶结构, 块状构造, 结晶颗粒较细, 节理裂隙较发育, 岩心呈短柱状。强风化, IV级软石, $\sigma_0 = 600$ kPa。弱风化, V级次坚石, IV级围岩为主, $\sigma_0 = 800$ kPa。

1.3.2 地质构造

渭河隧道位于第三纪天礼盆地的东北部, 为华里西期花岗岩及元古界变质岩组成次级盆地边缘, 晚第三纪以来, 区内构造运动较为活跃, 表现为藉河两岸山坡侵蚀强烈, 高差达 100~300 m, 第三系地层整体抬升并微向北倾。工点范围内在地质调查及勘探过程中未发现褶皱及断裂构造。

1.3.3 不良地质及特殊岩土

1. 不良地质

渭河隧道穿越藉河两岸黄土梁峁区, 该段黄土滑坡较为发育, 主要集中在二十里铺及北山, 现将对隧道有影响的滑坡详述如下。

(1) 董沟滑坡: 位于隧道浅埋 DK770 + 840 ~ + 900 段左侧 30 ~ 100 m 之外的董沟内。该滑坡为巨型黄土滑坡, 滑坡主轴长约 380 ~ 500 m, 宽约 500 ~ 600 m, 厚度约 30 ~ 50 m。滑坡主轴平行线路滑向董沟沟心。对隧道洞身工程无影响, 但董沟上游两岸及沟脑滑坡发育, 因此不能做为隧道弃渣场地。

(2) 罗家沟沟口滑坡: 位于隧道浅埋段 DK772 + 580 ~ DK772 + 700 左侧 35 ~ 80 m 之外的董沟内, 对隧道洞身无影响。经地质调查罗家沟内 (上游) 两岸滑坡发育, 多为巨型黄土滑坡, 因此罗家沟为轻微泥石流沟, 不能作为隧道弃渣场地。

(3) 藉河北山滑坡群: 从红旗山至渭河峡口延伸长度达 9 ~ 10 km, 主要包括水眼寨滑坡、阳坡滑坡、邓家滑坡、肖家滑坡、孙家坪滑坡、县家河滑坡、阎家河滑坡、周家山滑坡及红旗山滑坡等。各滑坡主轴约 1.5 ~ 1.8 km, 滑体厚度约 30 ~ 50 m, 局部可达 70 m, 均为多期、多次、巨厚深层滑坡。

其中阎家河滑坡 DK776 + 000 ~ DK776 + 420 段为滑坡前缘覆盖于藉河

阶地上的滑坡堆积体，堆积体底面距离拱顶 20~25 m 不等，对隧道洞身影响较小，DK776+420~DK778+020 段，滑面距离隧道洞身 50~280 m 不等，对隧道工程影响甚微；周家山滑坡 DK778+260~DK779+030 段为高位黄土滑坡，对隧道工程无影响。DK776+000~DK776+420 段滑坡堆积体距离隧道洞身约 5~15 m，且藉河阶地底部卵砾石土富含地下水，建议施工时做好排水措施并及时衬砌，避免围岩变形对滑坡稳定性产生影响。

(4) 刘家庄滑坡群：位于渭河隧道洞身 DK779+500~DK780+050 段黄土梁两侧的支沟内，隧道洞身位于滑坡群后壁残留的黄土梁内，对隧道洞身无影响。由于黄土冲沟下切较深，沟谷两岸形成数个规模相对较小并滑向沟心的黄土滑坡，一般主轴长约 50~100 m，滑体厚度约为 10~20 m，因此沟内不宜设置斜井的辅助设置，也不能作为隧道弃渣场地。

2. 特殊岩土

(1) 新近系泥岩。

隧道洞身穿越的新近系泥岩具有弱膨胀性、崩解性等，建议隧道施工时及时衬砌，避免因失水或渗水产生崩解造成围岩失稳。

(2) 湿陷性黄土。

隧道进口上部上更新统风积黏质黄土厚 20~40 m，湿陷性黄土分段如表 1.2 所示。

表 1.2 湿陷性黄土分段表

范 围	湿陷系数	自重湿陷系数	总湿陷量/mm	自重湿陷量/mm	湿陷性	湿陷等级	湿陷黄土厚度/m
DK770+028~DK770+165	0.018~0.105	0.017~0.156	2 625.35	1 657.95	自重湿陷性场地	IV 级很严重	30~35
DK770+165~DK770+340	0.016~0.031	0.09~0.13	1 075.5	1 349.3	自重湿陷性场地	IV 级很严重	8~15
DK770+340~DK770+845	0.009~0.076	0.049~0.094	1 511.1	981.0	自重湿陷性场地	IV 级很严重	20~25

隧道洞身黄土综合附近同一地貌单元资料分析，分布于山梁缓坡第四系上更新统风积黏质黄土，具Ⅲ~Ⅳ级自重湿陷性，湿陷土层厚度 15~20 m。

隧道洞身及浅埋段湿陷性黄土未涉及该地层。因此，隧道黄土梁峁区及藉河河谷阶地区地表黄土自重湿陷性对深埋隧道洞身无影响。

隧道出口段湿陷性黄土具IV级（很严重）自重湿陷性，湿陷土层厚度20~30 m。

(3) 松软土。

隧道范围内分布第四系上更新统风积黏质黄土，根据静力触探成果资料结合《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2007)说明表 6.3.1 地基土的判定条件，判定存在松软土，其中隧道进口段 DK770+100~DK770+165 段，松软土土层厚约 25 m，位于高程 1112.00 m 以上；DK770+165~DK770+845 段，松软土土层厚约 10~20 m，位于高程 1143.50 m 以上。隧道顶部的黏质黄土 (Q_3^{col3} 、 Q_4^{al3}) 判定为松软土，厚 15~25 m，但对工程无影响。隧道出口段黏质黄土为松软土，厚 25~35 m。

1.3.4 工程地质条件评价

(1) 渭河隧道进口位于藉河右岸黄土高阶地中部，地形相对较平缓、开阔，横向冲沟发育。工程地质条件相对一般。

(2) 隧道洞身先后通过黄土梁峁区、藉河河谷区、藉河北山黄土梁峁区至渭河南岸，地貌多样，地形复杂：

I. 隧道在 DK770+100~DK772+700 段位于黄土梁峁区，洞身主要位于新近系泥岩中，工程地质条件相对较好；

II. DK772+700~DK776+000 位于罗家沟及藉河浅埋段，隧道洞身位于新近系泥岩中，藉河河谷区第四系松散层孔隙裂隙水水量丰富，对其下部泥岩强风化层有一定补给，工程地质条件相对较差；

III. DK776+000~DK776+420 段为北山阎家河滑坡前缘覆盖于藉河阶地上的滑坡堆积体，堆积体底面距离拱顶 6~10 m 不等，对隧道洞身有一定影响，工程地质条件相对差；

IV. DK776+420~DK777+200 段为阎家河滑坡体，滑面距离隧道洞身 50~280 m 不等，对隧道工程影响较小，工程地质条件一般；

V. DK777+200~DK778+020 和 DK778+260~DK779+030 段为周家

山及麻家坪高位黄土滑坡，对隧道工程无影响，但隧道洞身的寒武系片麻岩与新近系泥岩接触关系复杂，工程地质条件一般；

VI. DK779 + 030 ~ DK779 + 900 隧道位于一稳定的黄土梁，洞身基本位于寒武系片麻岩中，但片麻岩受区域构造影响严重，较为破碎，工程地质条件一般。

(3) 兰州端洞口 DK780 + 041 位于稳定黄土梁前部，无不良地质现象，但黄土的湿陷性较大，工程地质条件较好。

1.4 水文地质

1.4.1 水文地质特征

1. 地表水

隧道下穿藉河通过，藉河为渭河一级支流，为常年流水，流量大，约 25 万 m^3/d ，水量随季节变化较明显，在 6 ~ 10 月降水集中时水量更大，藉河百年一遇洪水流量可达 3 540 m^3/s ；隧道区藉河两侧“V”形沟谷发育，平时干枯无水，在雨季时才形成短暂径流；泉水零星出露，常在沟底黄土与泥岩接触面处溢出，单泉流量一般小于 0.1 L/s，泉水流量季节性变化较大，干旱期常干涸。

2. 地下水的类型及补、径、排特征

隧道通过区地下水类型主要为松散层孔隙水和基岩裂隙水。松散层孔隙水主要分布于藉河河床、河漫滩及一级阶地区粗圆砾土、卵石土中，水量较丰富，含水层厚度约 2.0 ~ 14.0 m，河床地下水位埋深一般小于 3.0 m，河漫滩地下水位远离河床逐渐加深，最深可达 15 m，单孔出水量约 500 ~ 1 500 m^3/d 。隧道区松散层孔隙水主要接受大气降水入渗补给及藉河河水的侧向补给。在藉河河谷阶地区约 3.3 km 范围内隧道洞身上部分布有粗圆砾土、卵石土含水层，对隧道施工影响较大。

基岩裂隙水主要赋存于新近系泥岩、砂岩和寒武系大理岩、片麻岩中。

泥岩结构致密，产状平缓，节理裂隙不发育，岩层透水性差，径流缓慢，不利于地下水的储存和运移，水量较小，仅在局部孔隙发育段含少量水；砂岩风化严重，成岩作用差，含水条件较好，地下水具承压性；大理岩、片麻岩受构造影响，岩石节理、裂隙发育，水量丰富，钻孔揭示到该地层时，孔内漏浆十分严重，揭示到地下水位后，水位迅速上升至孔口，即孔内发生了涌水现象。隧道通过该段落时应提前做好地质超前预报工作，注意突涌水现象的发生。

隧道区地下水水化学类型为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Ca} \cdot \text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Mg}$ 型。矿化度为 0.474~2.267 g/L，除隧道进、出口及 DK770+850~DK772+000、DK777+800~DK779+350 段地下水对圬工不具氯盐、硫酸盐侵蚀性外，其余段落地下水对圬工均具氯盐和硫酸盐侵蚀性，环境作用等级分别为 L1~L2 和 H1。

渭河隧道水文地质条件较复杂，隧道通过区地貌单元、地层岩性变化较大，综合分析隧道通过区含水岩组类型、富水性分区、地形地貌及气候等因素，预测该隧道正常涌水量在 12 358 m³/d 左右，可能最大涌水量在 43 398 m³/d 左右，涌水量较大。

1.4.2 水文地质条件分析

该隧道洞身主要通过黏质黄土、强风化泥岩、弱风化泥岩、大理岩夹片麻岩地层，各类地层占比、渗透性、富水性详见表 1.3。

表 1.3 渭河隧道不同地层长度占比统计

序号	隧道里程	长度 /km	长度占比/%	洞身地层岩性	渗透系数 / (m/d)	富水性分区	备注
1	DK770+028~DK770+450	0.422	4.2	黏质黄土	0.000 1	贫水	
2	DK770+450~DK772+700	2.250	22.5	强、弱风化泥岩	0.017	弱富水	泥岩地层总长 7.35 km，占比 73.5%，其中，中等富
3	DK772+700~DK774+190	2.920	29.2	弱风化泥岩	0.025~0.090	中等富水	

4	DK774 + 190 ~ DK775 + 620				0.123 ~ 0.233		水泥岩占泥岩 总长的 39.7%
5	DK775 + 620 ~ DK776 + 000	2.180	21.8		0.002 5 ~ 0.025	弱富水	
6	DK776 + 000 ~ DK777 + 800						
7	DK777 + 800 ~ DK779 + 350	1.550	15.5	大理岩夹片 麻岩	0.017 ~ 0.046	中等 富水	
8	DK779 + 350 ~ DK780 + 040.7	0.694	6.8	片麻岩	0.000 1	贫水	
	总长	10.016	100				

从表 1.3 中可看出, 隧道全长 10.016 km, 在泥岩中通过长度累计 7.35 km, 占整个隧道长度 73.5%, 而该隧道正常涌水量约 14 860 m³/d, 可能最大涌水量约 54 624 m³/d, 隧道在藉河河谷区弱风化泥岩中涌水量约占整个隧道涌水量的一半 (正常涌水量约 6 791 m³/d 左右, 可能最大涌水量约 24 093 m³/d), 涌水量较大, 分析原因如下:

专题研究通过分层抽、提水试验, 止水效果良好, 所取得的水文地质参数, 为准确掌握隧道区的水文地质条件及分析预测隧道涌水量打下了良好的基础。

从试验的渗透系数值看, 藉河河谷区第四系松散层中渗透系数在 38.60 ~ 68.06 m/d, 富水性强; 泥岩渗透系数在 0.025 ~ 0.090 m/d, 富水性弱 ~ 中等; 泥岩夹砂岩互层的渗透系数在 0.123 ~ 0.233 m/d, 富水性中等。由以上数值可以看出, 藉河河谷区泥岩渗透系数高于藉河南岸黄土梁峁区、北山滑坡区泥岩渗透系数值 (0.002 5 ~ 0.025 m/d), 究其原因是由于藉河河谷区泥岩处于渗透系数高达 38.60 ~ 68.06 m/d 的大厚度粗圆砾土、卵石土下部, 第四系松散层补给条件好, 水量丰富, 且洞身顶部距第四系松散层底板约 15 ~ 28 m, 距泥岩强风化层底部约 1.6 ~ 30 m, 通过上部泥岩强风化层下渗补给下部泥岩弱风化层; 加之局部泥岩下部分布有含水量较大, 且具承压性的砂岩, 砂岩渗透系数在 1.61 ~ 4.67 m/d, 富水性中等, 使得夹在中间的泥岩地层不仅得到上部第四系的下渗补给, 还受到下部砂岩中地下水的入渗, 从而使该范