

文章编号: 0451- 0712(2002)04- 0109- 06

中图分类号: U 455. 4

文献标识码: B

特长大双线高速公路隧道施工技术

——晋焦高速公路牛郎河隧道施工

孙中林, 郝占胜, 杨建国

(中铁十七局集团公司 太原市 030032)

摘要: 以特长大双线高速公路隧道的施工技术为契机, 结合牛郎河隧道施工实际, 就全断面光面爆破开挖技术, 长大隧道“两种测量、两种平差”的方法和实行“四档次双保险制”控制测量, 新型防水材料施工和监控量测等技术作了着重介绍。

关键词: 牛郎河隧道; 大断面; 施工技术

1 工程概况和施工主要特点

1.1 工程概况

1.1.1 地质地貌

牛郎河隧道位于山西省晋城市泽州县柳口乡东岭村境内, 是山西省晋城市~ 河南省焦作市高速公路的咽喉工程, 地处太行山中低山区。海拔高度介于 724~ 1 046 m, 隧址区地形起伏较大, 且地势陡峭, 沟谷发育, 多呈“U”及“V”形峡谷, 相对高差达 320 m, 最大埋深 280 m。隧道主要穿越中奥陶统上马家沟组第三岩性段中厚层灰岩及第四岩性段薄层泥灰岩, 岩层产状平缓, 近于水平, 地表覆盖薄层第四系残坡积地层。进口 80 m 属浅埋层 III 类围岩, 薄泥层灰岩, 强弱风化, 节理发育, 岩体较破碎, 呈碎石状镶嵌结构, 围岩稳定性差。中间 IV 类围岩, 属中厚层灰岩, 硬质岩组, 产状平缓, 单斜构造, 节理较发育, 呈 X 形节理, 且贯通性良好, 由黄粘土残积物充填, 层间结合性差。地下水主要为岩溶水和基岩裂隙水, 呈滴水状或涌水状。

1.1.2 设计参数

隧道设计为双线、双洞、双车道、双侧电缆槽、排水沟, 属越岭特长大隧道。起讫里程, 左线为 LK26+415~ LK30+370, 全长 3 955 m; 右线为 RK26+405~ RK30+300, 全长 3 895 m。隧道内行车速度为 120 km/h, 采用分离式布置, 两洞净距 30 m。隧道净宽 9.75 m, 净高 6.80 m, 内轮廓半径为 527 cm 的单心圆。本标段左右线各设 2 处紧急停车带、车行横洞

和人行横洞, 洞门为端墙式。左线进口位于半径 $R = 2\,520\text{ m}$ 和 $R = 1\,500\text{ m}$ 的圆曲线上, 曲线长 894 m, 夹直线长达 1 200 m, 纵坡 $i = -1.990\%$, 横坡 $i = 1.5\%$; 右线进口位于半径 $R = 2\,500\text{ m}$ 和 $R = 1\,500\text{ m}$ 的圆曲线上, 曲线长 895 m, 夹直线长达 1 300 m, 纵坡 $i = -2.564\%$, 变坡点以 $R = 32\,641\text{ m}$ 半径相连。隧道以柔性支护体系结构的复合式衬砌为主要受力结构, 即以喷锚、钢筋网、钢格栅支撑、喷 C25 防水混凝土为初期支护, 模注混凝土为二次支护, 并敷设防水层防水; 路面为 C35 混凝土厚 25 cm, 上铺 7 cm 沥青混凝土作为上路面。洞身开挖 32.4 万 m^3 , C25 锚喷混凝土 1.1 万 m^3 , 模注混凝土 $2\,687\text{ m}^3$, C25 防水混凝土 2.6 万 m^3 , 钢筋 280 t, 路面 $6\,240\text{ m}^2$ 。

1.1.3 合同工期

本标段为第 11(A) 合同段, 工程合同工期为 1997 年 10 月~ 2000 年 7 月 1 日, 计 32 个月。于 1997 年 12 月 28 日开工开挖, 至 1999 年 6 月 12 日双双贯通, 比合同工期提前 12 个月; 衬砌于 1999 年 3 月 1 日开工, 至 1999 年 10 月 30 日完成, 比合同工期提前 7 个月; 2000 年 6 月工程全部竣工移交。

1.2 施工主要特点

1.2.1 设计等级高, 质量目标大

晋焦高速公路是穿越太行山脉的山区工程, 由于山势陡峭, 沟壑纵横, 全长才 48 km 的线路, 总投资就达 14.4 亿元。而且该路在设计上就创世界、全国之最的单位工程就达 6 个之多。其中就有号称目

收稿日期: 2001- 12- 30



前全国高速公路隧道最长、单线公路隧道全国第二的特长大双线隧道——牛郎河隧道。还有号称目前世界石拱第一跨的单孔跨径达 146 m, 主拱高 82 m, 桥面宽 23.9 m 的丹河特大石拱桥等。为此, 业主就提出了要把晋焦高速公路建设成“全国山区样板工程, 创国优、拿鲁班”的大质量目标口号。

1.2.2 地质构造复杂, 施工环境恶劣

由于此标段线路穿过地层为泥质灰岩、灰岩互层及角砾状灰岩、泥质白云岩互层, 呈灰白色, 受构造影响, 不但岩层产状近于水平, 单斜构造, 岩体节理发育, 而且隧道洞口段岩体强风化, 节理面充填物多为泥土等破碎物, 受振动会沿节理面坍塌, 给施工带来一定难度。隧道岩体以Ⅳ、Ⅴ类围岩为主, 占全线的 94.7%。加之处在太行山上施工, 环境恶劣, 交通不便, 造成进场难, 从驻地指挥部到施工现场, 杂草丛生, 乱石林立, 坡陡崖悬, 山上山下无水无电无道路, 仅有一条盘山简易便道连接晋张公路, 是材料运输的主要通道, 并且吃水难通讯难。生活、施工用水要从 15 km 以外的乡村运输, 电力设施又不能满足施工需要, 须用发电机发电来保证施工, 片石是当地仅有的地材, 砂子等材料需从外运进。由于山高谷深, 电波传不进, 电话打不通, 造成信息闭塞, 故造成管理指挥不便, 施工难度大, 工程成本高, 安全生产、质量成本控制成为本工程的一大敏感点。

1.2.3 两军对阵, 擂台挑战

本隧道由两个标段组成, 两家承建。另一单位为隧道局一处, 任务两家各一半。面对强手的对阵, 仅靠艰辛和传统的施工方式, 显然是难以取胜。故新技术、新工艺、新材料的应用和科学管理、严密组织, 强化安全、质量、进度、成本控制是本工程考虑施工方案的关键。

2 施工方案选择

根据隧道地质资料及现场踏勘, 选定新奥法施工技术, 利用大型机械配套施工作业线, 对Ⅲ类围岩采用上半断面开挖法作业, 对Ⅳ类围岩采用全断面光面爆破法施工, 对不良地质采用短循环、弱爆破、超前锚杆、强支撑等方法。Ⅲ类围岩循环进尺 1.5~2.0 m; Ⅳ类围岩循环进尺 2.5~3.0 m。装碴运输采用无轨装碴、无轨运输方案, 二次衬砌采用自动全液压式整体模板台车施工。

3 隧道掘进施工

3.1 Ⅲ类围岩的开挖与初期支护

在洞口段Ⅲ类围岩的施工中, 采用短进尺、弱爆破、格栅支护、上半断面开挖的方法进行, 其工艺流程如图 1 所示。

3.1.1 开挖

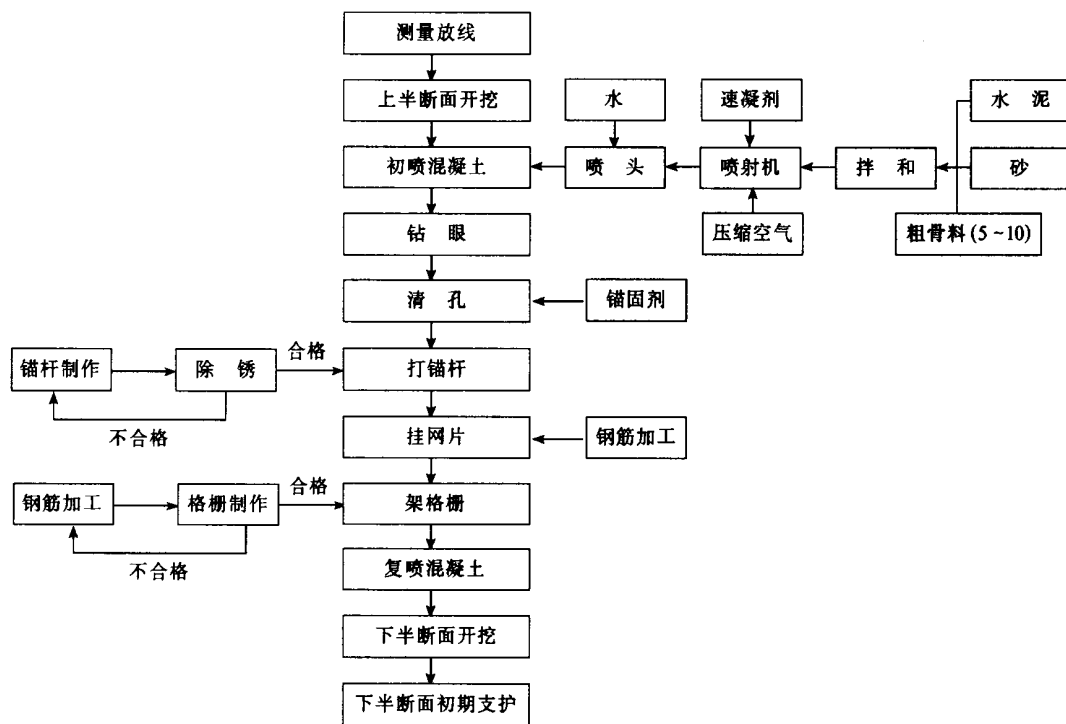


图 1 Ⅲ类围岩开挖与支护施工工艺流程

Ⅲ类围岩先施工上半断面, 高度为 4.0 m, 使半装碴运输机械能展开施工作业。每次循环进尺 1.5 ~ 2.0 m, 采用密钻眼、少装药的原则, 以减少爆破对围岩的扰动。

在光爆各参数的选择上, 选用 $\phi 37$ mm 钻头, 气腿式 7566 风枪钻眼; 不偶合系数 $D = \frac{d_k}{d_i} = \frac{40}{22} = 1.8$ (d_k 为爆孔直径, d_i 为药卷直径); 周边眼间距 $E = 12d_k = 48$ cm, 其中, 拱顶取 48 cm, 拱肩取 40 cm, 侧墙取 40 cm; 最小抵抗线 $W = 13d_k = 52$ cm, 其中, 拱肩取 52 cm, 侧墙取 40 cm; 装药集中度 q , 拱顶取 0.12 kg/m, 侧墙取 0.15 kg/m, 拱肩取 0.12 kg/m; 内圈眼间距为 100 cm; 直眼掏槽 6 孔 2.5 m; 装药结构为间隔均匀装药, 周边眼用导爆索联接, 炮眼口部 80 cm 之内用炮泥封堵。同时要求施工测量放样中线 and 周边误差在 ± 25 mm 之内; 周边眼比内圈眼深 10 cm; 内圈眼与周边眼用毫秒雷管段数相隔两段; 内圈眼药量单耗 0.6 kg/m³。

3.1.2 初期支护

洞口围岩虽然裂隙较发育, 但稳定好, 所以开挖时初喷混凝土锚杆紧跟开挖, 在每个循环钻眼放炮之后, 立即清理掌子面周壁围岩危石, 然后对上断面进行初喷混凝土封闭, 并施做长为 3.0~ 3.5 m 直径为 $\phi 22$ 的锚杆, 采用 8604 型锚固剂锚固, 28 d 后用锚杆拉力仪进行抗拉试验。

在开挖掌子面距离支护约 10 mm 时, 开始进行钢格栅施工, 再进行初期支护, 复喷 C25 混凝土厚 16 cm。钢格栅采用 4 根 $\phi 25$ 钢筋联结成 15 cm \times 15 cm 正方形框架, 每节节点用 20 cm \times 30 cm \times 2 cm 的钢板联结,

每根格栅间距 1.0 m, 格栅之间用 $\phi 2$ 钢筋连接, 间距 1.0 m, 并全断面铺设 $\phi 8$ 的 20 cm \times 20 cm 钢筋网, 以减少喷射混凝土的回弹量。

喷射混凝土采用潮喷法, 水灰比按 0.48 控制, 速凝剂掺入量为水泥用量的 5%。喷射混凝土之前, 用水将岩壁面的粉尘和杂物等洗干净, 水泥和粗、细骨料用搅拌机干拌, 加入少量水 (按水灰比的 20% 控制)。拌和好之后, 汽车运至喷射机前, 再用人工进行拌和, 并加入速凝剂。喷射作业应分段、分片由下向上顺序进行。喷头喷射方向与岩面偏角 10°; 喷头距受喷面控制在 0.6~ 1.0 m 之内, 喷头呈螺旋形均匀缓慢移动, 一般绕圈直径为 30~ 35 cm。

3.2 Ⅳ类围岩开挖与初期支护

Ⅳ类围岩采用全断面光面爆破法施工, 每循环进尺 2.5~ 3.0 m。初期支护采用喷射混凝土, 厚为 5 cm, 打锚杆, 每断面 5~ 6 根, 长 2.0~ 2.5 m。

3.2.1 光爆参数选择

钻头选用直径 $\phi 8$ mm; 不偶合系数 $D = \frac{d_k}{d_i} = \frac{42}{22} = 1.9$; 周边眼间距 $E = 12d_k = 50$ cm, 其中, 拱顶取 50 cm, 拱肩取 45 cm, 侧墙取 50 cm; 最小抵抗线 $W = 13d_k = 55$ cm, 其中, 拱顶取 60 cm, 拱肩取 55 cm, 侧墙取 45 cm; 装药集中度 q , 拱顶和拱肩取 0.15 kg/m, 侧墙取 0.18 kg/m; 炮眼深度 L 为 350 cm; 内圈眼间距为 100 cm, 装药单耗控制在 $q = 0.6$ kg/m³ 以内; 直眼掏槽 12 孔, 眼深 400 cm; 装药结构为间隔均匀装药。全部采用非电毫秒雷管、导爆管起爆、火雷管引爆, 塑料导爆管非电起爆。

Ⅳ类围岩药量配备见表 1。

表 1 Ⅳ类围岩药量配备

炮眼名称	眼深 cm	眼数 个	段数	每孔药卷数 个	每孔药量 kg	药量 kg	备 注
掏槽眼	400	10	1	16	2.4	24	$\phi 2$ 号岩石铵梯
		8	3	16	2.4	19.2	
辅助眼	350	11	5	10	1.5	16.5	$\phi 2$ 号岩石铵梯
		14	7	10	1.5	21	
		17	9	10	1.5	25.5	
		20	11	10	1.5	30	
周边眼	360	31	13	6.5	0.45	14	$\phi 2$ 号岩石铵梯
		14	13	7.5	0.54	7.6	
底板眼	360	7	13	9	1.8	12.6	$\phi 2$ 号岩石铵梯乳化
		12	15	9	1.8	21.6	
合 计		111				192	

3.2.2 钻眼

采用自行加工的简易钻眼台车,全车分为上、中、下三层,中间一层可伸出至拱腰位置。每个台车每循环备钻机 15 台,施工用 13 台,钻眼人员 17 人。每循环钻眼时间平均 3~4 h,每天平均 3 个循环,每循环平均 2.8~2.9 m。钻眼前,施工测量人员用红漆准确涂出开挖断面的中线、水平线和断面轮廓,标出炮眼位置,其误差 5 cm。在定位钻眼时,掏槽眼眼口间距误差与眼底间距误差、辅助眼眼口排距、行距误差、周边眼间距误差、外斜率都均 5 cm,周边眼外插角 $<3^{\circ}$ 。当开挖面凹凸较大时,按实际情况调整炮眼深度及装药量,力求除掏槽眼外的所有炮眼眼底在同一垂直面上。

4 施工测量

4.1 洞外贯通测量

为保证特长大隧道的施工测量精度,配备了先进的 GTS-311S 拓普康全站仪和 PC-E500 微型计算机各一台,水准仪和经纬仪各两台。由于在隧道测量中,除正常的洞外地面测量的偶然、对中、对点、仪器、视差、大气折光、地球曲率等的误差影响外,还有洞内的浑浊无光、空气潮湿、空气粉尘、机械油烟、拱顶滴水、稀泥路面、噪音等的影响,从而导致测量对点不准,方向观测偏移,仪器操作稳定性不良,测距精度偏差等。为此,在开工进洞前,就利用洞外导线控制坐标点、曲线交点,对隧道左、右线进行了进出口共 6 次的串线贯通测量,4 次坐标联测。经计算其结果为:左线切线串线到出口终点,方向偏 6.5 cm (允许误差为 20 cm) 的闭合差,坐标联测, X 值比设计大 24 mm, Y 值比设计大 62 mm; 右线切线串线到出口终点,方向偏 2.3 cm 的闭合差,坐标联测, X 值比设计小 32 mm, Y 值比设计小 29 mm,均符合要求,达到了贯通测设精度。

4.2 洞内施工控制测量

在洞内施工控制测量中,由于用传统的偏角法丈量弧长,不能保证精度,支距法和曲线段极坐标法,洞内又无法测量且坐标范围小。对此,为保证洞内测设精度,利用洞口导线控制点在洞口设置精度控制点;再利用洞口控制点进行测量,洞内的开挖每控制点进行测量设置,实际上,就是增加测回次数,对一个点在不同的条件下进行多次观测,并利用弦线偏角法和进出口已联测的大地坐标系相互进行控制。同时以算术平差法和严密平差法(列法方程

式),用 PC-E500 进行平差解算校正。即:用两种测量和两种平差,实际是四档双保险制,使其测量成果自然就形成了一个闭合导线环。这种双保险的测量方法,确保了洞内施工控制测量的精度,为长大隧道的贯通提供了坚强的保证。

5 防排水施工

5.1 防排水类别划分

本隧道按不同渗水情况,将围岩防排水分为 4 类: I 类为涌、突水段,即洞内雨季时外呈管状渗水,向洞内突水的地段; II 类为淋水地段,即洞内向下滴水或滴水呈线状下流,在裂隙及断层破碎带分布较多; III 类为滴、渗水地段,即表现为大面积岩壁湿润,局部积水不成线状下滴; IV 类为无水地段,即无论雨季与否,岩壁干燥无水下滴。

5.2 防排水措施

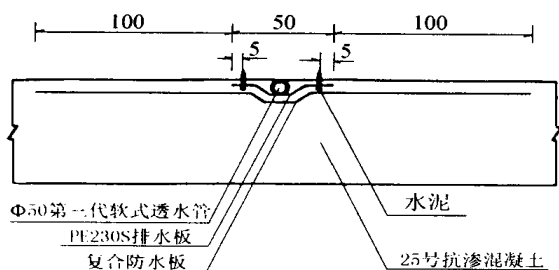
针对上述情况, I 类首先采用 $\phi 50$ mm 以上的排水管,将水引至隧道排水沟,在成片状涌突水地段,环向布置 $\phi 50$ mm 第三代软式透水管、排水管,外部用 PE 塑料排水板,将其固定进行引水,防水板外铺设复合式防水板,隔绝涌水,不致外渗,如图 2 所示。 II 类,在淋水处铺设环向排水板,将水引至边沟,再在排水板外铺设复合式防水板隔绝处理,如图 3 所示。 III 类,进行全断面铺设复合式防水板封闭,如图 4 所示。 IV 类,用抗渗混凝土衬砌。隧道衬砌全部采用 C25 抗渗混凝土进行施工,对 I~III 类地段的防水施工缝、沉降缝均采用 30 cm 宽的不锈钢止水带,环向沿沉降缝整体布设,无水段采用橡胶止水带,断层裂隙使用排水板。不锈钢止水带采用焊接,橡胶止水带用胶粘接。

5.3 防排水系统处理结构形式

通过采用 $\phi 100$ mm ($\phi 50$ mm) 第三代软式透水管、PE203S 排水板、复合型土工布防水板、 $\phi 100$ mm PVC 排水管以及 C25 抗渗混凝土相结合的处理方法,使岩壁的涌水首先排入环向设置的 $\phi 50$ mm 透水管中引出,少量渗水通过 PE 塑料排水板排出,余流极少的渗水由复合型防水板隔离,并一同沿防水板内侧引流到边墙基础纵向布置的 $\phi 100$ mm 软式透水管中,再经过横向布置的 $\phi 100$ mm PVC 排水管汇入隧道两侧排水沟内,流出洞外,使整个隧道形成一个全封闭的系统性的防排水体系。

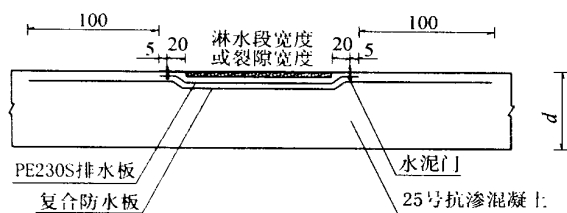
防排水施工工艺,其流程如图 5 所示。

5.3.1 环向 $\phi 50$ mm 软式透水管布置



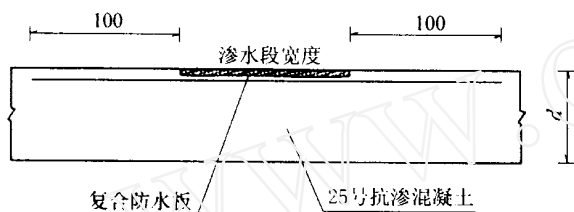
单位: cm

图 2 涌水段防水构造示意



单位: cm

图 3 淋水段或裂隙防水构造示意



单位: cm

图 4 渗水段防水构造示意

首先用射钉把透水管沿涌水段环向设置在围岩上,再用 PE 排水板铺设在透水管上,周边用射钉固定牢固,排水管铺设长度宁长勿短,以直达水沟底部为宜。环向透水管出口端,要同水沟处横向排水管套住。

5.3.2 纵向透水管布置

先用混凝土沿隧道围岩下侧底部纵向施工边墙基础平台,然后在边墙基础混凝土上纵向平顺铺设 $\Phi 100$ mm 软式透水管,每隔 10 m 沿透水管横向正交铺设 $\Phi 100$ mm PVC 排水管,挖成碗口状,纵向透水管卡入其中。排水管纵向坡度 3%,横向排水管进口应放在基础平台顶面与岩壁衔接的根部,然后沿边墙基础平台上部铺设高约 2 m 的防水板。防水板下缘,要将纵向透水管盖严,以防混凝土水泥浆漏入透水管。在浇筑边墙基础时,特别注意不要压扁、损坏、堵塞透水管和排水管。在无水地段,纵向透水管上面用 3~5 cm 碎石作反滤层覆盖其上,以防二次浇筑混凝土时堵塞透水管。

5.3.3 铺设复合型土工布防水板

首先对隧道开挖岩面的拱部、边墙作处理,清除尖锐凸石,使岩面平整圆滑;切割外露锚杆头并磨圆,以防划破防水板。然后在岩壁上用冲击钻打孔,把预先加工带有钢筋吊钩的木块打入孔中,吊钩外露长度不超过 2 cm,尖头朝向岩壁,将防水板内面的系带栓牢在吊钩上。防水板挂设宁松勿紧,宁长勿短,其搭接宽度 10 cm,用胶粘贴处宽度 5 cm。同时要粘接紧密、牢固,防水板的环向缝和底部缝都要

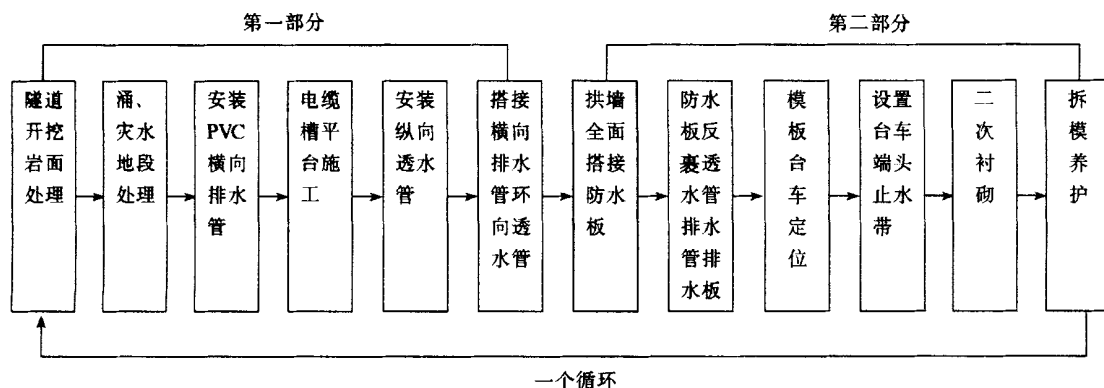


图 5 防排水施工工艺流程

粘接。由于隧道线路为下坡,所以进口防水板压在出口防水板之上,以保证流水畅通,整个过程在多功能台车上进行。边墙垂下的防水板反裹纵向透水管、环向透水管、排水板及横向 PVC 排水管进水口。

5.3.4 止水带安装

洞内每隔 10 m 设有沉降缝,其上环向封闭布设止水带。模板台车定位复位后,把预先加工成与衬砌台车模板弧度相同的木块紧贴在衬砌模板上,木块厚度

为衬砌混凝土厚度的一半,即 15 cm,宽度也为 15 cm,止水带置于二次混凝土厚度中间,再用另一块弧形木块压住止水带。同时,每一沉降缝两侧混凝土内各嵌止水带宽度的一半,即 15 cm。止水带中孔处于工作缝中间,将上下两块模板固定好,以防止水带脱落。止水带设置时,环向中心线要与沉降缝重合,浇筑混凝土时保证止水带无移动、无破损。

6 效果

在隧道开挖施工中,面对隧道施工工艺的挑战,始终坚持“光爆为基础、喷锚打先锋、通风出效益、铺底造环境、衬砌树形象”的施工准则,积极寻找适合岩质特点的科学施工方法,利用新奥法施工技术,配合大型机械配套施工作业线,采用全断面光面爆破等新技术、新工艺,使全长 3 955 m 的双线特长隧道开挖、贯通仅用了一年零六个月的时间,比合同工期提前 12 个月,还创造了日最高循环进尺 3.5 m,单口最快掘进达 260 m,并向对垒的隧道局方向多掘进 67 m,而且光爆破痕保存率分别达 95% (拱部)和 70% (边墙),平均线性超挖 < 15 cm 的新记录。加之科学管理、合理安排,在整个隧道开挖施工中,未发生一次塌方及人员伤亡事故,并被业主、局、总公司、部评为“安全质量标准化工地”。

在防排水施工中,坚持按“防、堵、截、排”相结合的综合治理原则,应用新型防水材料,采用纵向透水管、横向排水管、环向透水管、排水板、复合土工防水板以及抗渗混凝土衬砌的综合防水系统,使整个隧

道形成一个全封闭、系统性的防排水体系。经近一年半的观察,隧道衬砌混凝土未发现有渗水、漏水、潮湿现象产生。充分证明了这一防排水体系的施工是很成功的,防排水效果很好。

根据隧道施工和地材情况,积极组织科技干部和技术工人开展“五小”开发、“四新”运用、“QC”攻关等活动。在混凝土施工中,利用开挖弃石制砂,用人工砂代替河砂,并掺用外加剂等。通过各项活动,节约工程成本费达 140 万元左右。在隧道控制测量中,利用全站仪新设备。采取“两种测量、两种平差”的方法,实行“四档次双保险制”,使牛郎河隧道贯通测量控制在左线达 6.7 cm,我方仅调整 3.3 cm;右线达 5.6 cm,我方仅调整 2.8 cm。设计允许为 25 cm,均提高精度达 20 cm 左右。

在隧道衬砌混凝土施工中,由于对种种原材料严格进行检验试验和计量,并实行施工旁站制,防水抗渗混凝土经晋焦高速公路指挥部中心试验室的自检和抽检,其混凝土 28 d 平均抗压强度达 28 MPa,抗渗标号达 S9 未见渗透,均超过设计要求。加之,衬砌使用自行全液压式整体大模板台车施工,混凝土泵送,每一个循环 12 m,衬砌于 1999 年 3 月 1 日开始,至 1999 年 10 月 30 日完成,比合同工期提前 7 个月时间。不但保证了衬砌混凝土质量达到内实,且外观模板缝顺直,混凝土表面光洁,又提高了衬砌工效,创下了月单口单台车衬砌达 205 m 的新记录。隧道经 2000 年 6 月移交验收,工程质量合格率达 100%,优良率达 95%,取得了质量、效益的双丰收。

秦岭终南山公路隧道立项

国家计委日前批复了秦岭终南山公路隧道项目建议书。据了解,拟建的秦岭终南山公路隧道是国家规划建设的西部大开发八条公路干线中的内蒙古阿荣旗至广西北海和银川至武汉两条路线的公用段,是两条路线在陕西穿越秦岭的关键性项目,也是陕西省打通西安至安康通道,进而沟通秦岭南北地区交通的重要公路项目。

该隧道项目全长约 18 km,按照高速公路标准进行建设,项目总投资约 24 亿元,分两期建设。隧道的建设可使西安至安康间行车里程缩短 60 km,行车条件大为改观。同时,也为西北与西南、西北与中部地区之间提供便捷的公路通道。

据悉,目前我国已建成和在建的公路隧道长度均在 5 km 以下,秦岭终南山隧道属特长公路隧道,其规模在世界上也屈指可数。