

天竺山隧道横洞平行进入平行导坑施工技术研究

侯柳涛

中铁十一局集团西安建设有限公司

摘要：在长大隧道的施工过程中，为满足工期需要，往往需要增设平行导坑，横洞通往平导的过渡段受力复杂，处理不好可能形成长期的安全隐患，需要引起足够的重视。综合考虑各种因素，采取最优的施工方案，既安全又经济的进入平导是本次研究的重点。

关键词：高铁隧道；横洞；平行导坑；施工技术

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.06.033

引言

随着中国铁路的高速发展，铁路设施为代表的交通建设行业日益快速、完善，铁路市场忘中国周边发展的趋势明显，而山区隧道占比增大，导致长度长、埋深大的隧道比例也随之增加。而为符合现场快速，尽早通车投入使用的这一现场，辅助隧道快速完成施工的措施必不可少，其中最常见的就是增减隧道工作面，将隧道划分为若干个施工单元进行施工。划分隧道单元意味着增多多个辅助坑道，辅助坑道进入正洞、与正洞交叉口处受力特性、结构复杂，为保证施工安全，因此，采用合理的施工方案至关重要。

铁路施工现状：世界上对隧道辅助坑道与正洞交叉口处的结构、受力研究主要表现在辅助通道对主洞的变形、受力结构影响上，而在天竺山一号隧道的工况为垂直辅助坑道进入平行正洞的辅助坑道同时辅助正洞施工，主要对垂直方向进入平行方向后辅助坑道之间的受力、结构影响研究。

目前隧道的围岩、衬砌结构的受力、压力分析研究；辅助坑道与主洞之间的交叉结构通过三维有限元剖析模拟了整个的施工过程研究；斜交辅助坑道结构给主洞衬砌结构带来的影响研究；辅助坑道与正洞交叉口处的特性力学研究以及针对辅助坑道开挖对主洞造成的影响均有模拟研究。而本文针对横洞平行进入平行导坑施工难题，结合现场开挖的实际情况和施工安全问题，总结出天竺山一号隧道2#横洞进平导的最优施工方案，指导现场施工作业。

一、工程概况

天竺山一号隧道设计时速350km/h，双线隧道线间距5m，西安端洞口轨面高程879.22m，十堰端洞口轨面高程675.64m；最大埋深约690m。西安端洞口位于高坝店镇石头梁社区西沟河南岸斜坡中部，自然坡度约30°~40°；出口位于铜塔沟河北岸山坡上，自然坡度约20°~30°；进出口地表植覆盖较好。

2#横洞平导起点设置于2#横洞H0+055处，位于正洞左侧且与正线平行，平导中线距正洞左侧线路中线35米。

二、工程重难点

(1) 交叉口施工。交叉口施工受力复杂进平导困难。

(2) 洞内软弱围岩施工。在隧道中有部分地质条件复杂，在施工中进度及安全均受影响，如何做好软弱

围岩隧道工程的施工质量控制是本标段隧道工程施工的难点。

(3) 超前地质预报。灾害地质的施工探测，是不良地质隧道施工的重要工作，是防止重大安全事故的重要手段，所以超前地质预报是本工程施工重点

(4) 监控量测。监控量测是隧道施工安全保障的关键环节，所以做好监控量测是本工程施工的重点。

(5) 塌方。施工过程中一旦发生塌方，不但影响人员设备安全，工程结构安全，也影响工程进度，所以预防和处塌方是本工程的重难点。

三、横洞进平导施工技术

(一) 总体施工方案

天竺山隧道2#横洞与平导平行交叉，图3-1为2#横洞与平导交叉口平面图。2#横洞与平导交叉段H0+062.2~047.8为IVsm型复合衬砌，2#平导采用单车道+错车道布置。2#横洞施工至交叉段里程是按横洞正常断面开挖支护，在横洞立架完成后，对隧道中线位置交叉口段钢架两侧20cm处各增加2根长3.5米、壁厚3.5mmφ42锁脚锚管进行锁脚支护，在喷射砼时，对交叉口位置测量放样，预留平导洞口不做喷射砼封闭。待2#横洞施工过交叉口一定距离后落底，施作正洞钢架的托换措施，可对平导顶部3m范围内钢架纵向连接筋加强和锁脚加强的措施，使得平导范围的横洞钢架能和两侧钢架共同受力，同时沿平导拱部设一环φ42超前小导管，并尽可能支撑上部钢架；第三，割除平导洞口范围内的正洞钢架及喷射混凝土。最后开挖平导、并及时施作支护系统，确保施工安全。

平导拱架预留沉降量为15cm，开挖支护时按15cm预留量施作，平导与横洞交叉里程段预留量按20cm进行预留，加强段（交叉口）影响段开挖时按隧道轮廓面扩大20cm预留量施作，施工过程中超前地质预报及围岩监控量测是重点工作，必须持续对隧道监控量测及超前地质预报进行勤分析，专门管理，根据数据及分析结果，及时调整支护参数。

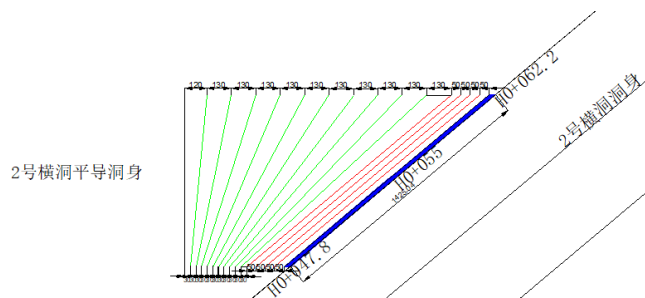


图 3-1 2# 横洞与平导交叉口平面图

(二) 施工步骤

1. 横洞与平导交叉口处加强段施工

平导与横洞交接影响范围内的拱架及加强支护即是平行导坑自身开挖的支护措施，也是保证横洞结构不受

平导开挖影响，平导对横洞影响段的受力变形的加强支护，此段受力复杂，因此，对本段采用以下施工方案进行加强：

(1) 交叉口钢架采用I14钢架+I16工字钢门架加强，门架采用I16工字钢双拼而成，横向焊接为整体受力。门架内位置处设置1根I14工字钢，交叉口处前4根锁口钢架间距50cm，里程P0+000~002.5；后采用10根异形拱架过渡到与平导开挖面齐平，里程为P0+002.5~011.1。以上里程都为中线处里程。

(2) 于平导相交处的2#横洞每根拱架拱顶位置处增设φ42壁厚3.5mm长度3.5米钢管支护4根。

(3) 2#横洞拱架与门框拱架位置处每根钢架增设2根φ42壁厚3.5mm长度4米的锁脚钢管。

(4) 2#横洞交叉口钢架与横通道门架采用焊接连接，使三岔口钢架共同受力。

(5) 门架与平导施工2根钢架后封闭掌子面，待横洞施工一定距离后再掘进施工平导。

(6) 其余支护参数均按设计参数进行支护。

2. 横洞进平导施工

横洞与平导交叉地段设计为IVsm级围岩衬砌段，开挖后围岩易变形、坍塌。因此，施工要坚持“管超前、短进尺、弱爆破、早封闭、强支护、勤量测”的原则，确保施工安全。

(1) 按平导断面尺寸及与横洞关系位置进行放样开挖门框位置，初喷4cm厚C25砼，立设双拼I16工字钢门框框架，门框框架竖向工字钢与横梁进行焊接，保证焊接质量，然后喷射C25砼。

(2) 门框框架立设完成后进行门框下第一根平导拱架立设，第一根平导拱架设置I14工字钢，门框下第一根平导拱架与门框之间采用I14工字钢焊接连接为整体，使拱架与门框共同受力，拱架连接完成喷射C25砼封闭。门框示意图见图3-2。

(3) 进行平导第二根钢架开挖支护进行喷射C25砼封闭，同时喷射5cm厚C25砼封闭平导掌子面。

(4) 测量放样出横洞与平导连接拱架接头位置用红油漆进行标记，采用炮头进行横洞与平导交界位置横洞的拱架砼凿除工作，凿除时应注意不得破坏横洞右侧要与平导连接的拱架，拱架砼凿除后进行拱架切割，切割时保证拱架连接接头位置平滑，以保证下步拱架焊接连接质量。（凿除拱架砼及切割拱架应每3根进行，不得一次性冒进凿除切割，每3根钢架砼凿除切割后立即进行平导与横洞拱架连接）。

(5) 横洞与平导拱架连接：横洞采用I14钢架支护，切割后的钢架与平导侧门架进行焊接，焊接时进行双侧16mm厚三角钢板邦焊，保证焊接质量，平导钢架与门框横梁进行有效焊接，并保证焊接质量，拱架连接完成后再拱架两端连接处打设4根长度3.5米φ42壁厚3.5mm小导管进行连接处加强支护，小导管与拱架进行焊接牢固并进行注浆。

(6) 待横洞与平导位置所有拱架替换连接完成后进行平导内开挖支护作业，开挖采用台阶法；

(7) 由于平导与横洞夹角为40°，平导与横洞交界处为斜交，需采用10根异形拱架过渡到与平导开挖面齐平，左侧间距30cm，右侧间距130cm。

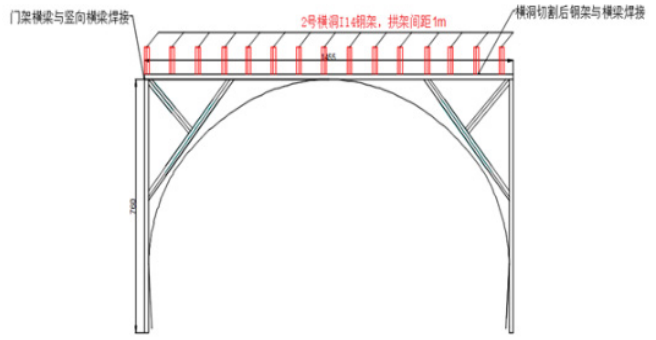


图 3-2 门框示意图

3. 监控量测施工方案

(1) 隧道内监测分掌子面地质监测和支护完成段监测。

1) 掌子面地质观察配合掌子面素描一起进行，在隧道每循环爆破完成后，未开始初期支护前进行。重点对掌子面开挖揭示的地质状况与设计情况进行比对，是否符合设计；出现与设计不符的情况时对岩层岩性、节理、出水情况等不良地质进行及时记录上报，制定预防措施。

2) 已施工完成段落的监测；主要根据已经预埋的监控量测点进行检测，对拱架的水平收敛、横纵向位移进行监测。

3) 隧道内检测根据现场状况在符合设计要求及标准要求的前提下进行并记录，必要时要加大观测频率。

(2) 必测项目测点布设。

各工法下的监测点位布置见下表。

表 3-1 监测点位布置

地段 开挖方法	一般地段	特殊地段
	全断面法	一条水平测线
两台阶法	每台阶一条水平测线，共两条水平测线	每台阶一条水平测线，两条斜测线
三台阶法	台阶一条水平测线，共三条水平测线	每台阶一条水平测线，两条斜测线

同里程段落的测点必须保证在一个开挖断面上，监测点的数量以及纵向距离布置必须满足设计及规范要求，可根据现场情况进行加密。拱顶下沉原则上设一个测点。

表 3-2 各级围岩监测点位布置原则

围岩等级	V~VI	IV	III	II
断面间距 (m)	5	10	30	50

四、挑顶施工质量保证措施

垂直辅助坑道进入平行导坑辅助坑道主要从隧道爆破以及加强支护进行研究探讨：

(一) 开挖质量保证措施

加强超前地质预报，坚持先预报后开挖；强化爆破设计；将变形观测纳入工序管理，及时量测分析。

根据围岩揭示情况、设计及施工方案、超前地质预报和围岩监控量测数据及其他材料机械等具体状况针对

性的调整开挖方案。

钻爆的炮眼长度、深度、外插角均按照项目实际总结的施工经验及方案进行循环指令指导施工。装药结构合理，周边眼的装药结构、导爆索的使用、炸药的利用率等等均根据数据分析后的结构及围岩揭示状况而定。

(二) 支护质量保证措施

所用的支护材料均满足设计要求；

砂浆锚杆作业程序是先注浆，后放锚杆。锚杆注浆采用砂浆拌合机现场拌制，随拌随用，保证拌合质量。砂浆配合比根据设计要求严格按设计配合比进行配制。砂浆应随用随拌，在初凝前全部用完，使用掺速凝剂砂浆时，一次拌制砂浆数量不应多于3个孔，以免时间过长，使砂浆在泵、管中凝结。锚杆孔中必须注满砂浆，发现不满须拔出锚杆重新注浆。锚杆施作完毕，强度达到10Mpa后，安设锚杆垫板，上螺帽。在有钢架地段施作锚杆时，将锚杆与钢架或连接筋焊成一体，以增加支护整体受力。锚注完成后，应及时清洗，整理注浆用具，除掉砂浆凝聚物，为下次使用创造好条件。

按图纸要求挂设加工好的钢筋网片，钢筋网片随初喷面的起伏铺设，绑扎固定于先期施工的系统锚杆之上，再把钢筋网片焊接在一起，网片搭接长度为1~2个网格。钢筋网在初喷混凝土4cm以后铺挂，且保护层厚度不得小于3cm。钢筋网应随初喷面的起伏铺设，与受喷面的间隙一般不大于3cm，与锚杆或其它固定装置连接牢固。开始喷射时，喷头距受喷面的距离宜为0.6m~1.8m，喷头垂直受喷面，钢筋网保护层厚度不得小于3cm。喷射中如有脱落的石块或混凝土块被钢筋网卡住时，应及时清除后再喷射混凝土。

钢架安装在掌子面开挖初喷完成后立即进行。钢架在全环封闭前置于稳固的地基上，安装前应清除各节钢架底脚下的虚渣及杂物。底部开挖完成后，底部初期支护及时跟进，将钢架全环封闭。为保证钢架的整体刚度，锁脚锚管与钢架采用 $\Phi 25L$ 型钢筋连接，接头处锁脚锚管与钢架之间、 $\Phi 25L$ 型钢筋与钢架接触点、 $\Phi 25L$ 型钢筋与锁脚锚管或锚管连接处采用焊接。 $\Phi 25L$ 型钢筋与格栅钢架接触点处焊接长度不小于10cm， $\Phi 25L$ 型钢筋需焊接与锁脚锚管上部。钢架落底接长在单边交错进行，每次单边接长钢架1~2排。在围岩地层较好时可同时落底接长和仰拱相连并及时喷射砼。接长钢架和上部钢架通过垫板用螺栓牢固准确连接。架立钢架后应尽快进行喷砼作业，以使钢架与喷砼共同受力。喷射砼分层进行，先从拱脚或墙角处由下向上喷射，防止上层喷射料虚掩拱脚（墙角）不密实，造成强度不够，拱脚（墙角）失稳。为保证钢架位置安设准确，隧道开挖时在钢架的各连接处预留连接板凹槽。初喷砼时，在凹槽处打入木楔，为架设钢架留出连接板（和槽钢）位置。钢架按设计位置安设，在安设过程中，钢架应尽量密贴围岩并与锚杆焊接牢固，当钢架和初喷层之间有较大间隙应每隔2m用砼预制块楔紧，钢架背后用喷砼填充密实。钢架纵向连接采用 $\Phi 22$ 螺纹钢筋。为抑制松弛围岩早期变形，开挖后须尽快采用相应强度和刚度的钢架支撑，架立后能立即发挥支撑机能：钢拱架支撑脚部应座落在基岩上或用锁脚锚杆稳定，钢架与围岩之间的较大间隙部位用钢楔间隔楔紧，再用喷砼填充密实，避免留下空隙和隐患。

五、施工资源配置

(1) 施工人员：开挖作业人员23人；初期支护工班14人；喷砼作业工班6人。

(2) 施工机械：风动凿岩机30台，电动空压机8台，大型挖掘机2台，装渣车2台，湿喷机械手2台，后八轮8台，衬砌模板台车1台等。

六、施工注意事项

(1) 加强隧道围岩超前预报，根据超前预报围岩变化情况，适时采取恰当的超前支护措施，并调整相应围岩的支护参数。

(2) 交叉口段施工严格控制循环进尺和台阶高度，不良地质段落施工严格遵循减少扰动，控制循环开挖进尺，加强支护措施以及勤分析监测及超前数据的原则进行施工。

(3) 软弱围岩开挖后，根据围岩收敛情况，采取加强支护或及时施工二衬混凝土，争取尽早成环。

(4) 隧道超前地质预报和监控量测必须贯通隧道施工的整个工序，为及时调整支护参数，确保施工安全，创造良好的施工环境奠定基础。

(5) 隧道横洞转平导施工前，要及时对前方围岩进行水平钻探，探明前方围岩情况。

(6) 爆破完成后及时进行锚喷支护，尽早封闭成环。

(7) 对临近断层、破碎带、浅埋沟谷等特殊地段，加强支护、监控量测及施工管理，并及时调整支护措施及工法。

(8) 塌方处理贯彻“宁强勿弱、稳扎稳打、安全第一”的宗旨，确保施工和结构安全”的原则。

(9) 塌方发生后，除非是堵住人员需要抢险，否则不宜盲目急于处理，避免塌方范围扩大。严禁盲目洞内清方，以防掌子面继续塌方。

七、结语

天竺山一号隧道2#横洞进平导施工技术，遵循“严把质量，确保安全，兼顾进度”的原则，坚持对施工过程中严密监控、动静结合、科学管理、确保安全。做到方案可靠，且不断结合现场开挖的实际情况，优化方案，及时反馈调整施工方法，形成辅助坑道平行进入辅助坑道施工技术。

参考文献

- [1] 张志强，许江，万晓燕. 公路长隧道与横通道空间斜交结构施工力学研究[J]. 岩土力学，2007，No. 133(02)：247-252.
- [2] 何川，张志强，何本国. 长大隧道横通道受力分析[J]. 铁道学报，2010，32(01)：128-132.
- [3] 罗彦斌，陈建勋，王梦恕. 隧道斜交横通道施工对主隧道衬砌结构的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(S2)：3792-3798.
- [4] 张宪鑫. 深埋交叉隧道开挖变形行为及衬砌应力研究[D]. 重庆大学，2007.
- [5] Takino K, Kimura H, Takeda N, et al. Three-dimensional behaviour of tunnel intersection[C]. In: Proceedings of Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, 1985. 68-69.