

超小净距并行隧道施工工法

(TGJGF-03·04-38)

中铁一局集团有限公司

一、前言

中铁一局三公司承建的宁波招宝山公路隧道为超小净距(3.4~4.2m)并行隧道,采用两相邻隧道同工序相隔一定距离平行施工;中岩墙采用水平全长注浆锚杆预加固;上半断面采用光爆技术控制对地面建筑的震动,下半断面采用控制爆破技术尽量不破坏中夹岩墙围岩;开挖后立即进行喷锚,格栅支护、二次衬砌,二次衬砌采用先仰拱后墙拱二次模筑混凝土技术,取得了成功。本工法是在1995~1998年宁波招宝山隧道施工过程中形成的。

二、工法特点

1. 采用新奥法和控制爆破技术,以合理的开挖顺序及开挖方法、初期支护紧跟、对中夹岩墙加固处理,确保了隧道围岩和施工结构稳定,施工安全可靠。
2. 采用监控量测信息技术指导施工,使施工处于受控状态。
3. 采用中夹岩墙法施工,具有一定的社会效益。
4. 可有效地控制地面沉降,对周围环境影响小。

三、适用范围

适用于Ⅲ级以上围岩、两并行隧道之间距离不小于3.4m(单线铁路隧道为 $0.6B$,双线铁路隧道为 $0.4B$,三车道公路隧道为 $0.3B$)的超小净距隧道。

四、工艺原理及关键技术

超小净距隧道施工以新奥法的基本原理为依据,以“短开挖、快封闭、强支护、勤量测”为指导。两隧道根据地质情况分先后施工,先施工围岩较好的一侧,掘进一定距离后再施工另一侧隧道。两者按同工序保持一定距离平行施工,将开挖面合理划分单元,自上而下实施有序分部开挖,喷、锚、网、钢格栅联合初期支护,随挖随护,紧跟工作面。先开挖的一侧隧道边墙开挖后即对两隧道中夹岩墙用水平全长注浆锚杆作预加固。初期支护、中夹岩墙与围岩共同组成承荷体系,协同变形—承荷,充分发挥围岩自身承载能力。建立监控量测体系,实施信息化管理,保证施工过程处于受控状态;根据时间—空间效应原则及量测信息实施混凝土衬砌。

关键技术:横向分部、纵向分序开挖技术,控制爆破技术,中夹岩墙稳定及信息化施工技术。

五、工艺流程(见图1)

六、施工要点

(一)施工准备

1. 敷设风、水、电管线,修建施工便道,布置施工现场,做好机具设备、人员配置、材料准备。
2. 根据地质勘探资料和施工设计,详细分析了解工程地质和水文地质情况,认真编制施工组织设计,制定施工监测计划。

(二)并行隧道开挖施工顺序(见图2)

先分部开挖围岩较好一侧的先行隧道,滞后一定距离分部开挖另一侧隧道,以保证中夹岩墙稳定,开挖分三部分进行,即上半断面开挖一定距离后,中槽跟进,两侧墙滞后开挖。先行隧道开挖、初期支护及仰拱每个工序均要先于后行隧道一定距离,先行隧道上半断面开挖后立即进行初期支护,后行隧道上半断面

滞后先行隧道约 50m 距离平行推进。

在先行隧道下半部完成之前开挖后行隧道上半断面,有可能引起隧道拱脚部位岩体较大破坏,对开挖两个隧道相邻侧边墙不利,因此,需采用贯通中岩墙的预应力砂浆锚杆加固隧道相邻侧墙拱脚以上岩体,确保围岩稳定;同时强调,必须在先行隧道边墙开挖、预加固两隧道间岩墙、完成仰拱之后一段时间、隧道变形基本停止后,才能开挖后行隧道的边墙部分。后行隧道初期支护及仰拱完成后,进行先行和后行隧道内层模筑混凝土衬砌施工。

(三)控制爆破

在上半断面开挖中主要解决爆破振动对周围环境的影响;在下半断面的开挖中主要考虑确保中岩墙围岩的稳定和完整,以及控制后行隧道对先行隧道边墙初期支护的影响。控制爆破振动主要采用控制装药量和分段微差爆破技术来实现。

1. 超小净距隧道控制爆破开挖技术要点

- (1) 为保证中岩墙的稳定与安全,采用中槽先进,两侧预留光爆层的作业方法。
- (2) 中槽靠中岩墙一侧采用防振带(预裂带)降低爆破对中岩墙和先行隧道边墙初期支护的振动影响。
- (3) 预留光爆层主爆孔的爆破应尽量为光爆孔创造临空面,这样有利于保证光爆效果和控制在围岩的爆松厚度。
- (4) 平行隧道中一隧道开挖爆破时在另一隧道边墙初期支护上引起的振动速度控制在 1.5cm/s 以下。
- (5) 采用微差爆破技术时,考虑到爆破震动波形叠加作用的影响,时差可采用 100ms 。

2. 上半断面开挖控制爆破

采用微振动爆破进行施工,控制掏槽眼一次起爆药量来降低振动强度。应用光爆技术提高爆破开挖质量,使上半断面的周边轮廓基本规整,减小中槽爆破对上半断面的靠近及对中岩墙底部部位围岩的扰动。施工中应加强爆破振动监测,依据监测结果及时调整爆破参数。一般单位耗药量按 $q = 0.6 \sim 0.9\text{kg/m}^3$ 控制。

3. 下半断面开挖控制爆破

(1) 先行隧道下半断面控制爆破

首先必须严格控制其对中岩墙的破坏范围和影响深度;其次要考虑其对后行隧道上半断面围岩及初期支护的影响程度,确保后行隧道上半断面的安全;再次通过先行隧道的开挖,在进入中岩墙侧开挖以前,找出能确保中岩墙稳定及安全的爆破方法和爆破参数。一般单位耗药量按 $q = 0.4 \sim 0.5\text{kg/m}^3$ 控制。

爆破开挖时中槽先进,两侧预留光爆层,为确保中岩墙安全,抵消中槽开挖后岩石应力释放对中岩墙稳定的不利影响,靠近中岩墙侧预留光爆层的厚度应大于外侧的厚度。开挖必须在外侧光爆层取得较好

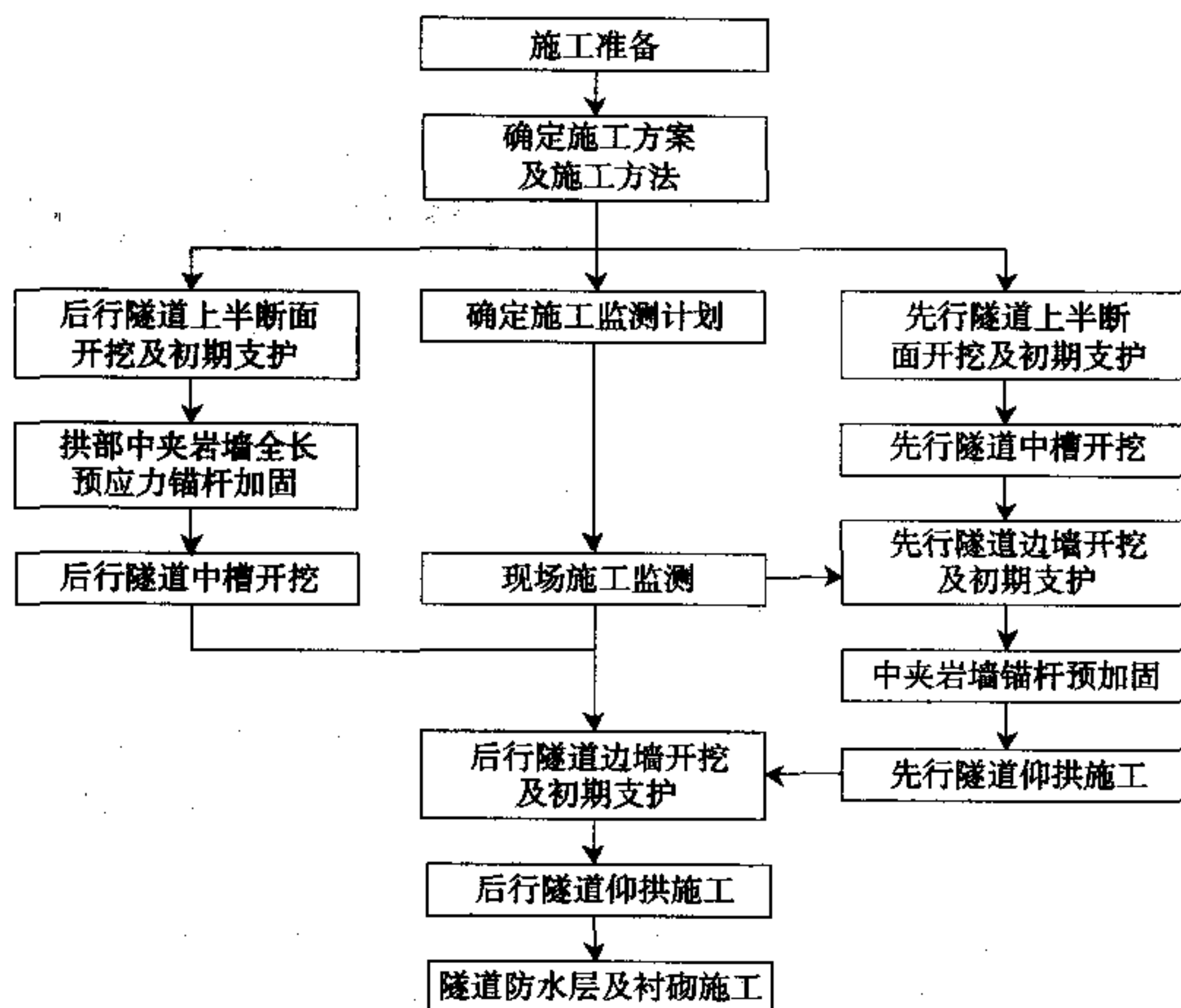
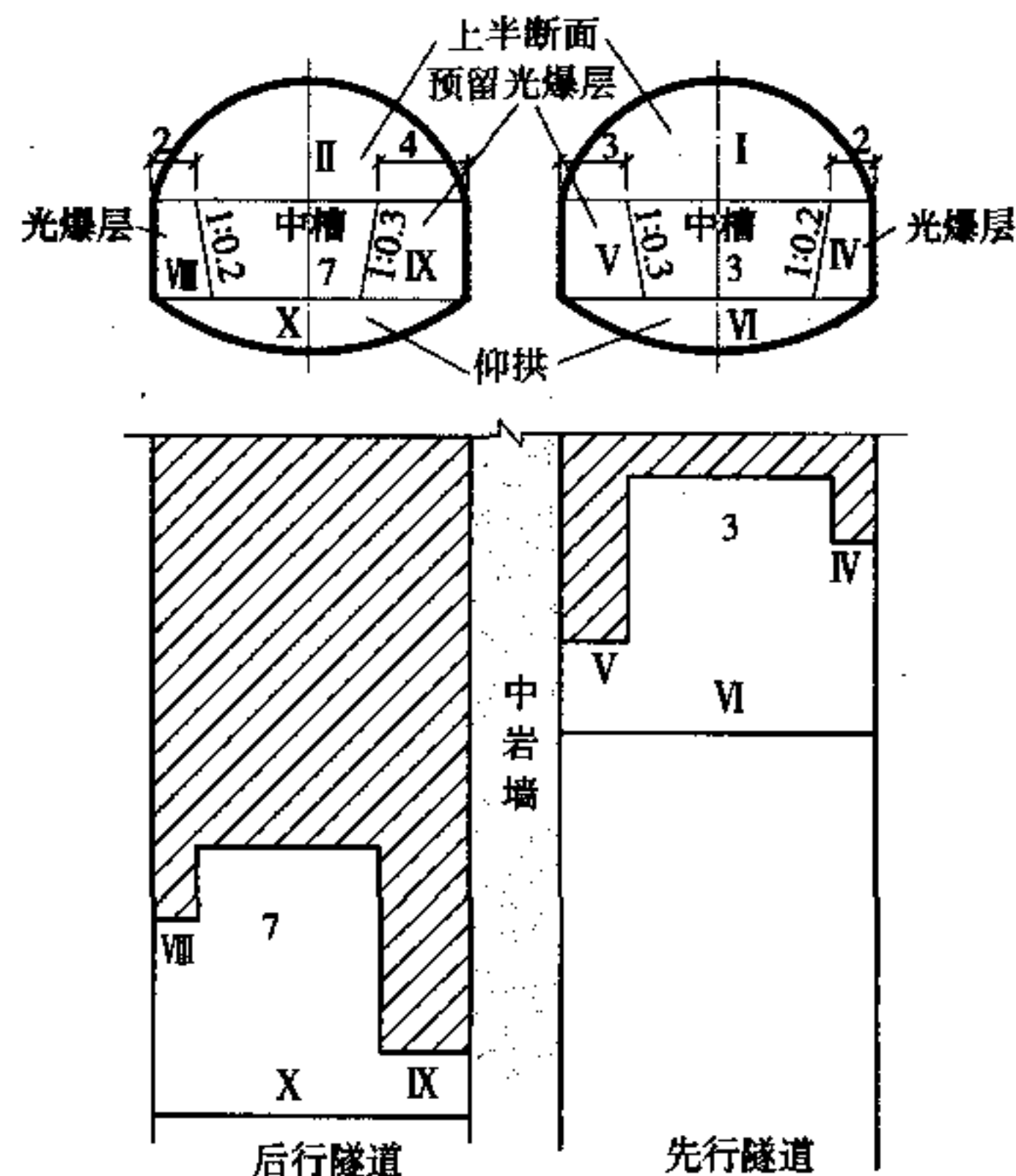


图1 超小净距并行隧道施工工艺流程



的爆破效果后开始。

中槽开挖按常规爆破设计,设计中宜采用偏上的掏槽方法,兼顾掏槽和创造临空面的作用。

(2) 后行隧道下半断面控制爆破

后行隧道下半断面岩石爆破必须保证隧道中岩墙受到的影响控制在尽量小的范围内,其单侧围岩的最大破坏范围不得大于1m;先行隧道边墙尤其是内边墙的岩石和初期支护不能因爆破而受到损伤。

(3) 控制爆破原则

采用光面爆破技术控制超挖,保证边墙平整及对围岩的影响深度;采用微差爆破技术控制振动的量值大小,以控制爆破对先行隧道边墙的影响;采用预裂爆破技术降低爆破振动对围岩的影响。

(4) 爆破开挖方法

采用中槽先进、两侧预留光爆层的爆破方法。

在中岩墙侧布设防振带,即布一系列孔先爆形成一破碎带在中岩墙和中槽主爆破区之间起降振作用,该列孔应用较小的药量最先起爆。

中岩墙侧预留光爆层的厚度取4m左右,一方面有足够的厚度保证中岩墙围岩在中槽爆破后不至于因围岩暴露时间过长、岩体卸荷及应力释放使中岩墙岩体受损,另一方面又能创造较好的临空面减少爆破振动影响并保证光面爆破的效果。施工中,外侧预留光爆层与中槽爆破之间的距离,一般不超过2m,同时采用挖后速护等措施来控制岩体变形,中岩墙侧围岩爆破后暴露时间控制在24h以内。

4. 光面爆破施工

(1) 钻孔 隧道边墙光爆孔应有一定外插角,该外插角控制在 5° 以内,光爆后稍加清理后再钻凿下一循环的光爆孔,再进行初期支护。

(2) 装药 光面爆破采用弱装药,用小药卷和增大径向不耦合系数的方法改善光爆效果,药卷捆绑在导爆索上,用竹片固定使光爆药卷正确定位于光爆孔内,同时将竹片靠近要保护的围岩一侧以改善光爆效果,由于预留光爆层一般有斜度,故底部不必加药。

(3) 软弱地层爆破参数的调整措施 ①适当增加主爆孔的装药量或减小主爆孔的最小抵抗线值,保证光爆层前的岩层有较大的抛出;②光爆孔使用高段别微差雷管,拉大主爆孔与光爆孔的起爆时差;③降低光爆孔的线装药密度,直至光爆孔内仅用双股导爆索。

(四) 出渣运输

采用挖掘机装渣,自卸汽车运输。

(五) 初期支护

初期支护采用喷锚构筑法,由拱架+全长注浆系统锚杆+钢筋网+喷射混凝土构成的初期支护为主要受力结构。为保证中岩墙的稳定及安全,在中岩墙处设单向全长砂浆粘结加固锚杆,锚杆用 $\phi 22$ 钢筋,呈梅花形布置。

1. 初期支护施工程序为:测量定位→钻孔→锚杆支护→喷混凝土→安设拱架→挂设钢筋网→喷混凝土。

2. 通过对地质及支护状态、隧道周边位移、拱顶下沉、地表沉陷、拱架应力、锚杆拉拔力等的监控量测,判断支护是否稳定与可靠,必要时调整支护参数。

3. 开挖断面达到要求尺寸及时出渣后,立即喷射混凝土4~5cm,打设锚杆,按设计要求安装拱架、挂钢筋网、分层喷射混凝土直到设计厚度。喷射时先喷拱架与岩面之间的间隙,再喷拱架周围,最后喷拱架之间,使拱架与开挖轮廓之间所有间隙充填密实。

4. 系统锚杆拱部用锚固剂锚固,两侧边墙及中夹岩墙锚杆采用注浆机先注浆后打入杆体再焊接孔口端部垫板、封闭孔口的方法施工。

(六) 中岩墙预应力锚杆施工

为保证中夹岩墙的稳定及安全,在中夹岩墙起拱线以上设后张预应力锚杆,锚杆用 $\phi 22$ 钢筋按设计预应力锚固。具体做法是:在后行隧道上半断面按设计位置钻孔打穿岩体,凿除杆体两端混凝土弧线部分,使垫板与混凝土面密贴,张拉端设在后行隧道内,锚固端设在先行隧道内,由后行隧道上半断面送入杆

体,将锚固端的垫板与杆体焊接,并用喷射混凝土封闭孔口,用注浆机沿杆体向孔内注浆,注浆后用锚杆拉拔器立即张拉至设计预加拉力,用扭矩扳手锁定双螺母,用喷射混凝土封闭孔口。预应力锚杆安装如图3所示。

(七)防水层及模筑混凝土施工

1. 防水层设在喷射混凝土层与模筑衬砌混凝土之间,材料一般由土工无纺布及PE防水板组成,由于模筑混凝土是先墙后拱法施工,防水层的铺设顺序由墙到拱环向铺设,搭接缝设在起拱线以上1.5m处。施做防水层时先在初期支护表面抹砂浆找平,再铺设一层土工布和PE防水板。防水板布设在围岩与衬砌之间,防止地下水从拱墙渗漏出;在防水层与围岩之间加一层土工布,起缓冲保护作用,防止由于围岩的凸凹不平,锚杆、钢筋

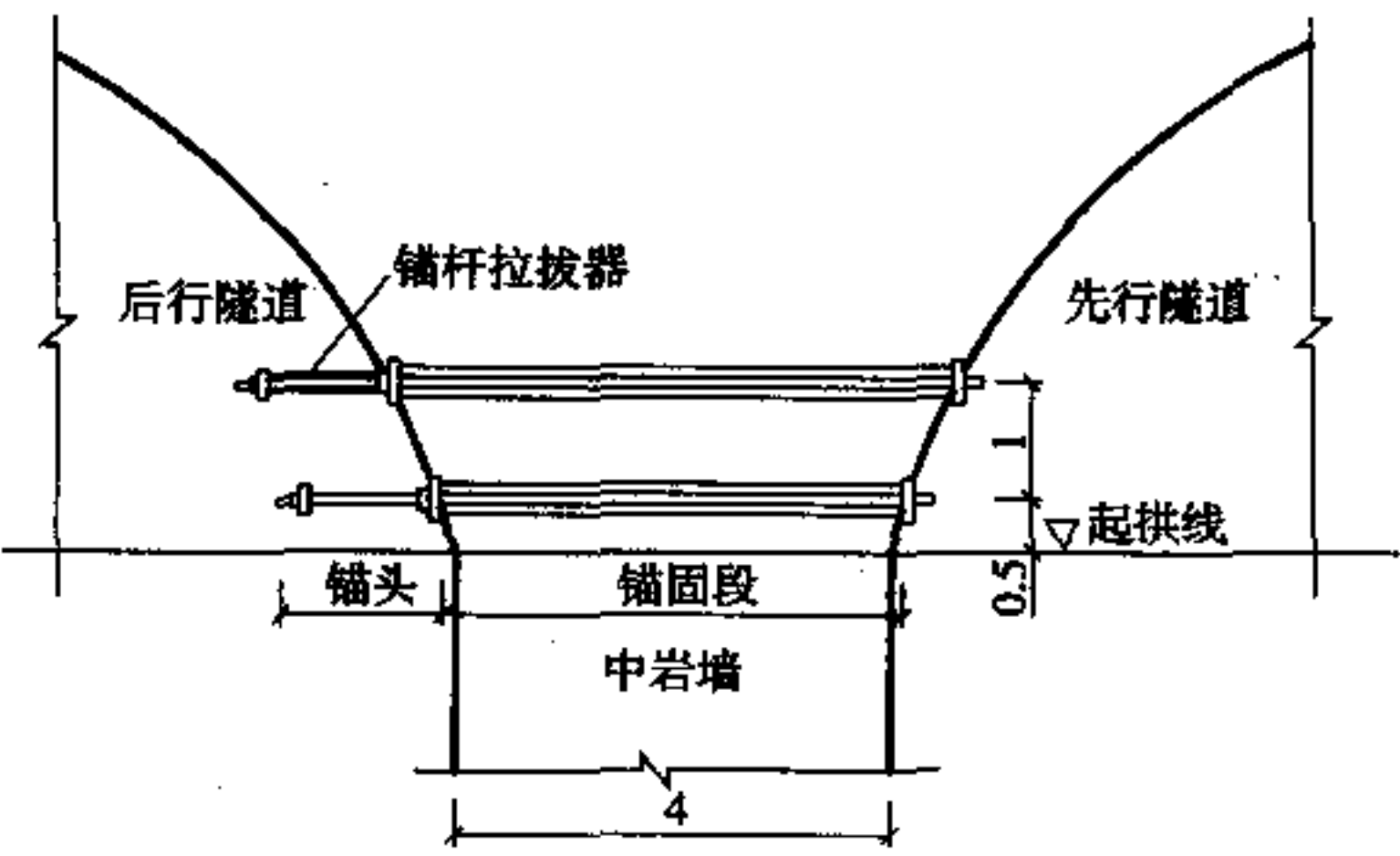


图3 预应力锚杆安装(单位:m)

等带有尖角的利器凿穿防水板而影响防水效果,同时土工布有良好的透水性,还可对地下水起疏导作用。

2. 防水层铺设完成以后,绑扎钢筋,立模浇灌二次衬砌混凝土。二次衬砌施工应尽量采用整体式模板台车施工,以提高工效和质量。

七、监控量测

超小净距并行隧道施工时,为验证设计的正确性和施工方法的合理性,在施工中需进行岩体位移、围岩压力和层间接触应力、喷射混凝土应变等量测,了解隧道开挖及支护过程中岩体松动情况、围岩压力变化规律和支护结构的稳定性等。主要施工监测项目见表1。

表1 监控量测项目

序号	量测项目	量测仪器和工具	测点布置	量测频率
1	围岩及支护状态	地质描述及拱架支护状态观察	每一开挖环	开挖后立即进行
2	地表沉降	水准仪和水平尺	每10~20m一个断面,每断面7~11个测点	$H < 2B$ 时1~2次/d $H < 5B$ 时1次/2d $H > 5B$ 时1次/周
3	拱顶下沉	水准仪、钢尺等	每5~10m一个断面,每断面1~3个测点	$H < 2B$ 时1~2次/d $H < 5B$ 时1次/2d $H > 5B$ 时1次/周
4	周边净空收敛位移	收敛仪	每5~10m一个断面,每断面3~5个测点	$H < 2B$ 时1~2次/d $H < 5B$ 时1次/2d $H > 5B$ 时1次/周
5	声波测试	岩石声波检测仪	选择有代表性的断面在拱脚位置布测点	爆破后进行
6	掌子面前方地质预报	陆地声纳	在上半断面进行测试	每一循环均需进行
7	岩体垂直位移	岩石地面挠度仪	每10~15m一个断面,每断面布置3~5个测点	$H < 2B$ 时1~2次/d $H < 5B$ 时1次/2d $H > 5B$ 时1次/周
8	岩体水平位移	单点位移计	选择有代表性断面,每个断面3组,每组4个测点	$H < 2B$ 时1~2次/d $H < 5B$ 时1次/2d $H > 5B$ 时1次/周
9	压力	钢弦式压力传感器	选择有代表性断面布置测点	$H < 2B$ 时1~2次/d $H < 5B$ 时1次/2d $H > 5B$ 时1次/周
10	混凝土应变	钢弦式混凝土应变计	选择有代表性断面布置测点	$H < 2B$ 时1~2次/d $H < 5B$ 时1次/2d $H > 5B$ 时1次/周

注:1. H 为开挖面距量测断面的距离; B 为隧道开挖宽度;

2. 地质描述包括工程地质和水文地质。

量测的目的在于:①判断地面变形及隧道内变形对周围环境、隧道施工安全的影响程度;②判断中岩墙的受力变形是否影响中岩墙的稳定。以此优化设计,指导施工,确保施工安全可靠顺利。

八、机具设备

施工机具应根据地质、隧道断面及长度配备。单口作业所需参考设备见表2。

表2 单口作业所需机具设备

序号	作 业	机具设备名称	规格型号	单位	数量	备 注
1	施工通风 照明	轴流式通风机	90-1	台	2	通风
		低压变压器	24V, 20kW	台	2	掌子面照明
2	开挖	空压机	20m ³ /min, 120kW	台	2	高压供风
		两臂台车	CLJY12.2	台	2	钻孔
		风镐	G10	台	10	开挖
		手持风钻	7655	台	4	钻孔
		挖掘机	EX300	台	1	开挖
		装载机	ZL50	台	1	出渣
		自卸车	CA141	台	4	出渣
		潜水泵	扬程 50m	台	4	抽水
		泥浆泵	100m ³ /h	台	2	排污水
3	初期支护	钢筋切断机	GQ40-F	台	1	
		钢筋折弯机	GW40-1	台	1	
		电焊机	BX-300	台	3	
		台式钻床	24025	台	1	
		混凝土喷射机	TK-961	台	1	
		搅拌机	JZC350	台	1	
		注浆机	DB6-101	台	3	
4	二次衬砌	搅拌站	25m ³ /h, LS500	台	1	
		混凝土搅拌运输车	JGC5270GJB	台	2	
		混凝土输送泵	HB60D	台	1	
		插入式震动器	ZN35, ZN50	台	10	
		模板台车	自制	台	2	
5	量测及测量仪器	全站仪	拓普康 301	台	1	方向控制
		经纬仪	J2	台	1	
		水准仪	C40	台	1	
		塔尺		根	2	
		收敛计	GY-85	个	2	
		岩石声波检测仪		台	1	
		陆地声纳		台	1	
		岩体地面挠度仪		台	1	监控量测
		单点位移针		台	2	
		钢弦式压力传感器		台	4	
		钢弦式混凝土应变计		台	4	
		地质罗盘		个	1	
		地质锤		个	1	
		锚杆拉拔器	BL-150B	个	1	

九、劳动组织

单口作业劳动组织见表3。

十、质量控制

制定工程创优规划,设专职质量检查人员,配合监理工程师对原材料、各工序质量进行全面检查。认真贯彻 ISO9002 质量标准,特殊工种实行持证上岗,实行全过程质量控制。

(一)按规范施工,可详细参阅公路、铁路隧道施工技术规范及验收标准。

(二)严格控制进料及加工

1. 对混凝土骨料级配、含泥量及外加剂质量严格把关,坚持进一次料,抽查一次,不合格的坚决清退。拌制时严格按配合比计量,缩短运输存放时间,随拌随用(一般掺速凝剂的混凝土待浇时间不超过 30min)。

表3 单口劳动组织

序号	工作项目	作业内容	人数
1	开挖	风镐手	4
		两臂台车司机	2
		风钻手	8
		装药起爆	8
		出渣	12
2	初期支护	锚杆、格栅制作	6
		洞内焊接	4
		安装锚杆	4
		混凝土喷射	4
		混凝土拌合	11
3	量测	技术员	3
		测量工	4
4	二次衬砌	立模	8
		灌注混凝土	8
		运输混凝土	2
		搅拌站	6
5	其他	分队长	1
		技术负责人	1
		专职安全员	1
		质检员	1
		试验员	2
		电工	2
		修理工	2
		机械、车辆司机	8
		辅助人员	3
合计			115

2. 钢构件下料按 1:1 大样为准,加工时尽量减少热变形,加工完用模具检验校正,焊点强度应严格把关。

3. 泵送混凝土应严格控制坍落度损失,严禁擅自加水,外加剂应严格计量。

(三)加强施工管理

1. 努力减少超欠挖,喷射混凝土应严格按有关规范控制。
2. 以新奥法原理指导施工,定位与方向控制要有专人负责。
3. 加强监控量测管理,及时反馈信息,提高应变能力。
4. 严格按爆破设计打眼、装药、起爆,提高爆破质量。
5. 加强工序衔接管理。

十一、施工安全与环境保护

1. 爆破、量测人员和专职安全员必须经过专业培训并取得证书,方准上岗作业。
2. 必须加强全员安全意识教育,交叉施工地段应设调度员加强调度。
3. 洞室开挖后缩短掌子面暴露时间,及时施作初期支护。
4. 随时对量测数据进行分析,根据信息反馈指导施工。
5. 危险火工品严格按《爆破安全规程》及当地公安部门要求执行。
6. 严格控制钻爆施工工艺,提高施工管理水平,加强现场技术力量,进行技术培训,确保爆破技术方案得以正确实施。提高爆破质量和水平,确保围岩、中岩墙及周围环境的安全。
7. 加强对车辆及人员管理,遵守交通管理规范,坚持文明施工。
8. 加强洞内外电力、通风、给排水管线的管理,防止漏电、漏风伤人。
9. 加强机械保养维修,降低机械的废气排放,不符合排放标准的车辆不允许上路,噪声大的机械改装消声器。

十二、效益分析

1. 对铁路的改造和复线建设,本工法的推广应用对线路选线、设计及施工具有一定的指导和借鉴作

用,有一定的社会效益。

2. 对于高等级公路和高速公路,采用本工法能解决为保持上、下行两隧道大净距而增加的困难,能少占地、改善公路线路情况。

3. 本工法可减少绕线增加的铁路、公路长度的费用,其社会效益和经济效益相当可观。

4. 与采用梁柱法或钢筋混凝土中隔墙法将两隧道并成一个大跨度隧道相比,本工法可节省费用 $1/3 \sim 1/2$ 。

十三、工程实例

由中铁一局集团第三工程公司承建的招宝山双线平行隧道由两座独立并行的单体隧道组成,是宁波大桥的组成部分之一。

招宝山隧道起止里程为 DK0 + 860.6 ~ DK1 + 029.6,全长 $2 \times 169\text{m}$,洞身内轮廓为直墙,割圆拱、割圆仰拱,开挖宽度为 13.95 ~ 14.45m,高度为 12.25 ~ 12.35m,隧道沿线路纵向设 3% 的纵坡,两相邻隧道净距 3.4 ~ 4.2m,属超小净距并行隧道,隧道最大埋深 34m,进出口端埋深仅为 0 ~ 5m。隧道通过的山体为火山岩,隧道周围为旅游胜地招宝山公园。施工中确保地面建筑的稳定和安全很关键,确保中岩墙的稳定和安全的技术难度大,在施工中主要采取了以下技术措施:

1. 进行多种工况和围岩的数值模拟,了解隧道围岩应力、破坏状况,据此确定施工方法和加固、稳定围岩措施。安排合理的施工顺序,采用两相邻隧道同工序相隔一定距离平行施工的方法。以利于围岩加固和保护围岩。

2. 对两隧道间中岩墙采取加固措施,保证隧道围岩的稳定。

3. 采用控制爆破技术,控制震动对地面建筑的影响,控制对中岩墙围岩的破坏。

4. 采用长台阶法开挖,开挖后立即喷锚和支护,用先仰拱后墙拱法模注混凝土进行二次衬砌。

5. 量测监控及施工地质工作检测,及时提供信息,指导施工。

该隧道于 1995 年 12 月正式开工,1998 年初完成主体工程,施工过程中对周围环境影响较小,施工质量和安全取得良好的效果。

执笔:杨永强 赵有歧 李长山 拓守盛