

城市浅埋硬岩特大断面隧道施工工法

(TGJGF-03·04-35)

中铁隧道集团有限公司

一、前言

《城市浅埋硬岩大断面隧道施工工法》是依据新奥法原理,采用双侧壁导洞预留核心岩柱的方法开挖,通过综合减震措施减小爆破开挖时的震动来保护周边建筑,使用全断面整体式钢模台车进行二次衬砌,同时采用综合监测手段对施工全过程进行动态监控和实时处理的一个工法,它在重庆轻轨较新线一期工程临江门车站工程建设过程中形成。

二、工法特点

1. 采用双侧壁导洞预留核心岩柱开挖,二次衬砌紧跟核心岩柱上部开挖,控制二次衬砌面与核心开挖面的距离的施工工艺,减小峒体变形,控制地表沉降,保证了工程和地表建筑安全。
2. 紧邻建、构筑物处的开破通过超前导洞先行、预留光爆层光面爆破、周边密排空眼减震、开挖面增打减震孔、非电不对称起爆网路等综合减震技术减小爆破震动效应,保护周边环境。
3. 采用全断面整体式钢模台车进行二次衬砌,保证结构的整体性和防水效果,加快施工进度,保证工程质量,提高经济效益。
4. 采用综合动态监测技术,实时反馈信息,及时修正施工方法和支护参数,确保工程安全。

三、适用范围

1. 适用于新奥法指导施工的大断面、特大断面即开挖宽度 18m 以上、开挖高度 12m 以上隧道及地下工程。
2. 紧邻既有建筑需要采用控制爆破开挖Ⅱ~Ⅲ级围岩的浅埋暗挖特大断面地下工程。
3. 围岩较完整较厚层的软岩、中硬岩、硬岩特大断面地下工程。

四、工艺原理

1. 采用双侧壁导洞预留核心岩柱的方法,将大跨减小,大断面隧道分割成几个小洞室分部施工,利用核心岩柱作为支撑,从而控制变形,保证安全。
2. 以控制爆破理论和新奥法理论为基础,通过综合减震手段,减小爆破开挖时的地震效应,减小开挖爆破对围岩的扰动,保护周边环境,提高围岩自稳能力,保证工程安全。

五、施工工艺

(一)施工工艺流程(见图1)

(二)开挖步序(见图2)

(三)说明

1. 双侧壁上导洞1开挖支护施工时,左右两侧应错开 50m 以上。

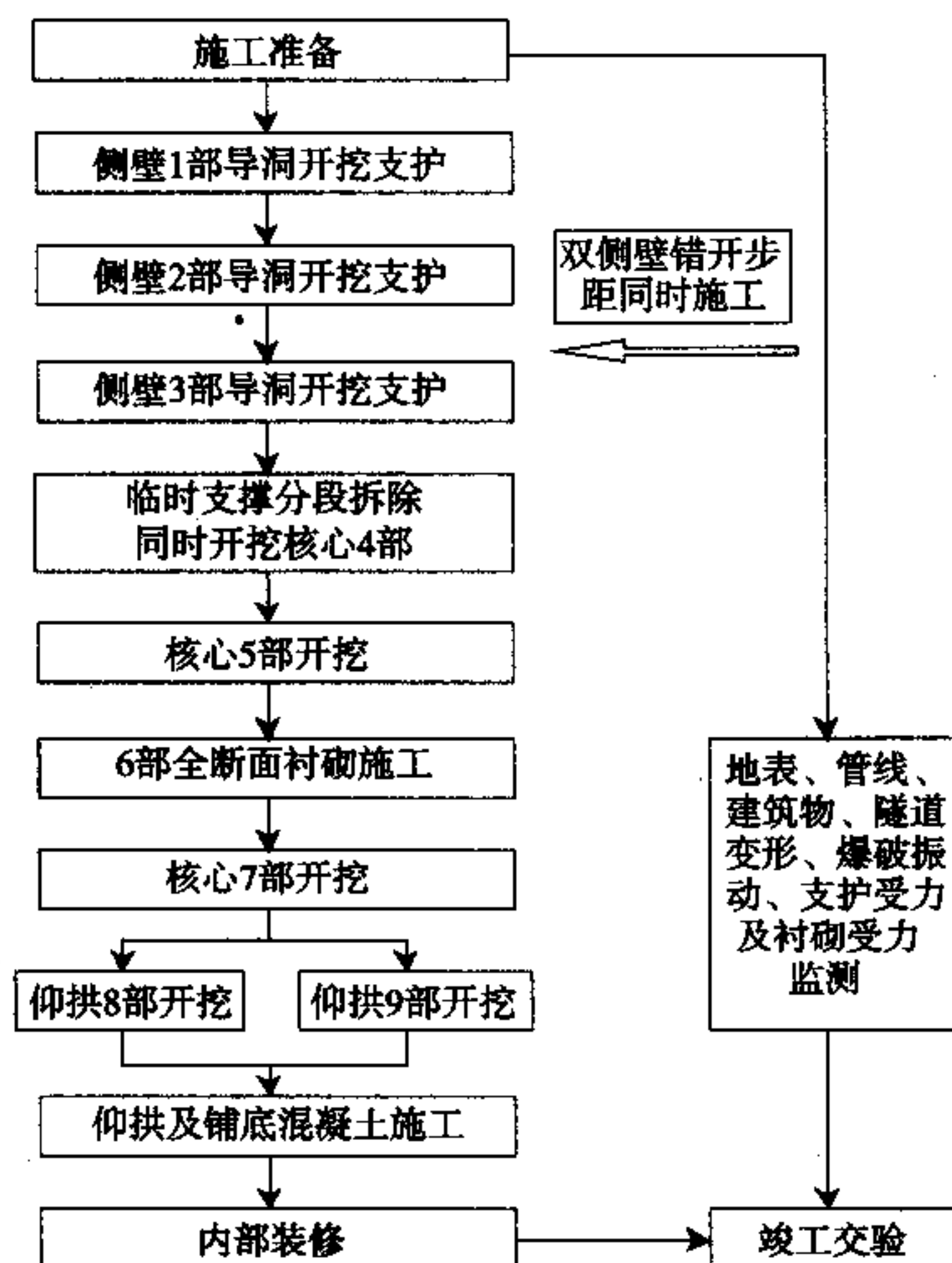
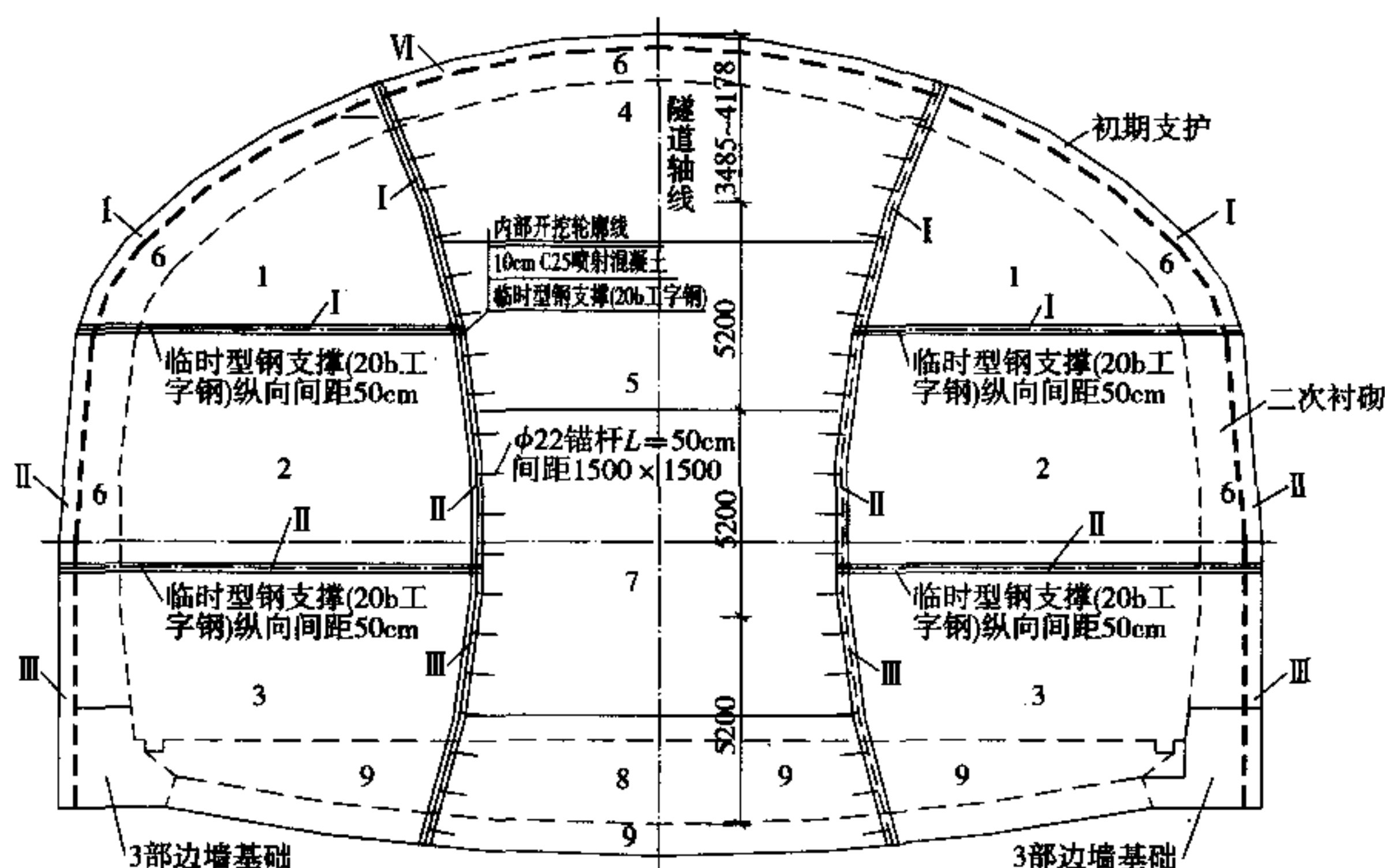


图1 施工工艺流程

2. 双侧壁中部导洞 2 的开挖左右两侧需错开 $2d$ (d 为跨度)。



注:1. 临时中隔墙采用厚 5cm 的 C25 喷射混凝土及长 0.5m 的 $\phi 22$ 锚杆支护,以 20b 工字钢支撑加强,钢支撑每 0.5m 一榀,临时锚杆采用普通药包锚杆。

2. 图中阿拉伯数字表示开挖部序,罗马数字表示初期支护及施工二次衬砌步序。

图 2 隧道开挖步序(单位:mm)

3. 下部导洞 3 的初期支护 III、临时中隔墙及其支护 III 须紧跟开挖进行。及时浇注边墙基础和仰拱钢筋混凝土。

4. 采用模板台车施工隧道全断面二次衬砌 VI,严格控制二次衬砌面与核心岩柱开挖面的距离。

5. 及时浇注 9 部仰拱钢筋混凝土及仰拱填充。

(四)施工方法及注意事项

1. 施工准备

(1)熟悉设计图纸,调查收集工程环境、周边建筑的基础资料,评估工程施工对周边环境、建筑物的影响及控制指标。

(2)分析工程重点、难点及风险,制订详细的施工方案和措施,针对关键工序如爆破开挖、二次衬砌编制作业指导书。设计制作全断面整体式衬砌台车。

(3)编制监测方案,在分析工程重点、难点及风险的基础上,针对性地选择关键部位、关键断面作为重点监测对象,根据工程风险及难度选择合适的监测项目、监测频率和监测密度。布置地表及周边建筑的监测点,购置监测仪器。

(4)编制测量方案,布置测量桩点,引入测量导线并完成施工测量准备。

(5)培训施工人员,组织采购所需设备、材料。

2. 开挖爆破

(1)爆破方案设计原则

①以地面建筑物基础底部(或地面)至爆源中心距离 R 为安全控制半径,借助于经验公式 $Q_m = R^3 (V/K)^{3/\alpha}$,并以设计质点振动波速度限值作为控制标准,进行反算各部分所允许的单段用药量,并进行试爆,取得合理的爆破参数。

②采用短台阶分部开挖,以创造多临空面条件,每部分又分多次爆破,控制爆破规模和循环进尺,以达到控制质点振动速度的目的。

③炮眼按浅密原则布置,控制单眼装药量,使有限的装药量均匀地分布在被爆破体中,采用非电毫秒不对称起爆网路降低隧道爆破所引起的地震强度。

④上导洞 1 部掏槽眼位尽量布置在开挖部位的底部靠核心土一侧,以加大掏槽部爆源至地面建筑基

础底部(或地面)的距离,减小掏槽爆破对周围建筑的震动影响。

⑤上导洞1部及拱部4部开挖断面周边眼间均设直径为50mm的密排减震空眼,以作为减振和光爆导向眼。中导洞2、3部开挖时在两侧各预留1m的光爆层,以增加爆源至周围地面建筑基础底部(或地面)的距离,同时降低爆破振动对核心岩石和临时支撑的破坏,保证上部支撑基础的稳定。

⑥核心7部、仰拱8部的爆破以松动爆破为主,控制爆破飞石对衬砌台车及衬砌混凝土表面的破坏。

⑦根据地面、洞内爆破振动监测结果,及时调整钻爆参数,以满足环境及施工要求。

(2)减小爆破振动强度的方法

采用光面爆破可收到保护围岩、减小爆破振动的效果。必要时还可采用低爆速炸药、开挖面增打减震孔、预留光爆层、非电毫秒不对称起爆网路技术等综合措施来减轻爆破引起的地震强度。

(3)预留光爆层确保施工安全

侧壁中导洞2部的开挖是在1部爆破开挖后初期支护及临时支护施工完毕的前提下进行的,1部初期支护的格栅拱脚及底部是支承在2部的开挖面岩石的顶面,采用拉中槽超前、两侧预留光爆层左右交替爆破的施工方法,不仅可以降低爆破振动强度,还能避免上部格栅拱脚及临时型钢支撑底部同时悬空,下部的格栅拱及临时型钢支撑能及时接上,及时喷混凝土封闭岩面和格栅拱,使整个支护体系形成封闭环,确保开挖稳定,有利于控制隧道超欠挖。

侧壁下导洞3部的开挖方法与侧壁中导洞2部的开挖方法相同。

(4)爆破参数的选择

爆破参数的确定采用理论计算方法、工程类比法与现场试爆相结合,在保证爆破振动速度符合安全规定的前提下,提高隧道开挖成型质量和施工进度。

①炮眼深度 L

爆破设计的炮眼深度主要受爆破震动强度控制,设计炮眼深度根据爆破部位不同和控制标准经计算后确定,一般为1~2.0m。

②炮眼数目 N

炮眼直径采用42mm,每次开挖面积约为36~50m²,每m²钻眼数为1.5个(未包括光面爆破炮眼)。

③炮眼布置

A. 周边炮眼

采用经验公式和工程类比法确定:间距 $E = (8 \sim 12)d$ (d 为炮眼直径),最小抵抗线 $W = (1.0 \sim 1.5)E$,装药集中度 $q = 0.1 \sim 0.15\text{kg/m}$ 。

B. 掏槽眼

掏槽眼主要布置于侧壁导洞1部。一般掏槽爆破在整个断面爆破中往往产生最大的震动强度,这是因为掏槽爆破只有一个临空面,如果能在最初就提供第二临空面,便可显著地降低掏槽爆破的震动强度。我们从掏槽效果及减小震动强度等方面综合考虑,采用空眼双层复式楔形混合掏槽。

C. 掘进炮眼

为降低爆破震动强度,循环进尺根据开挖部位不同来确定,掘进炮眼深度 L 根据循环进尺来确定。

最小抵抗线通常均小于炮眼深度,当炮眼直径在35~42mm范围内时,最小抵抗线 W 与炮眼直径和炮眼深度有如下关系:

$$W = (15 \sim 25)d$$

或

$$W = (0.3 \sim 0.6)L$$

在坚硬难爆的岩体中,或炮眼较深时,应取较小的系数,反之则取较大的系数。

④单眼装药量的计算

隧道爆破,炮眼所在的部位不同,所起的作用不同,装药量也不同。周边眼装药参数在上面已确定。其它炮眼的装药量均可按以下公式计算:

$$q = kaWL\lambda$$

式中 q ——单眼装药量(kg);

k ——炸药单耗(kg/m^3);
 a ——炮眼间距(m);
 W ——炮眼爆破方向的抵抗线(m);
 L ——炮眼深度(m);
 λ ——炮眼部位系数(参照表 1 选取)。

表 1 中硬岩隧道炮眼部位系数

炮眼部位	掏槽眼炮	扩槽炮眼	掘进槽下	掘进槽侧	掘进槽上	内圈炮眼	二台炮眼	底板炮眼
λ 值	1.5~2.0	1.0~1.2	1.0~1.2	1.0	0.8~1.0	0.5~0.8	1.2~1.5	1.5~2.0

⑤炮眼堵塞

堵塞是使炸药在受约束条件下提高爆炸能量利用率,堵塞长度不小于 20cm,堵塞材料采用炮泥(组分:砂:黏土:水=3:1:1)。堵塞要密实,不能有空隙和间断。

⑥爆破器材的选择

根据微振爆破的特点及爆破部位的不同,选用不同的爆破器材。

无水地段,采用二号岩石硝铵炸药;有水地段,采用乳化炸药,周边炮眼采用小药卷(直径 25mm),其它炮眼采用 $\phi 32$ (乳化)、 $\phi 35$ (销铵)标准药卷。

孔外采用火雷管起爆,连接件及孔内均采用非电毫秒微差雷管(1~15 段)。

火管雷采用导火索引爆,周边炮眼间隔装药采用传爆线传爆。

⑦装药结构

隧道爆破炮眼中的炸药可采用正向、也可采用反向起爆,其装药结构见图 3。实验结果表明,仅装瞬发雷管的炮眼应该采用正向起爆,其它炮眼采用反向起爆,即掏槽眼的首段采用正向起爆,这样可得到较好的岩渣块度。

周边眼采用间隔不偶合装药形式,为保证每个周边眼内炸药同时起爆,须使用传爆索连结各药卷。

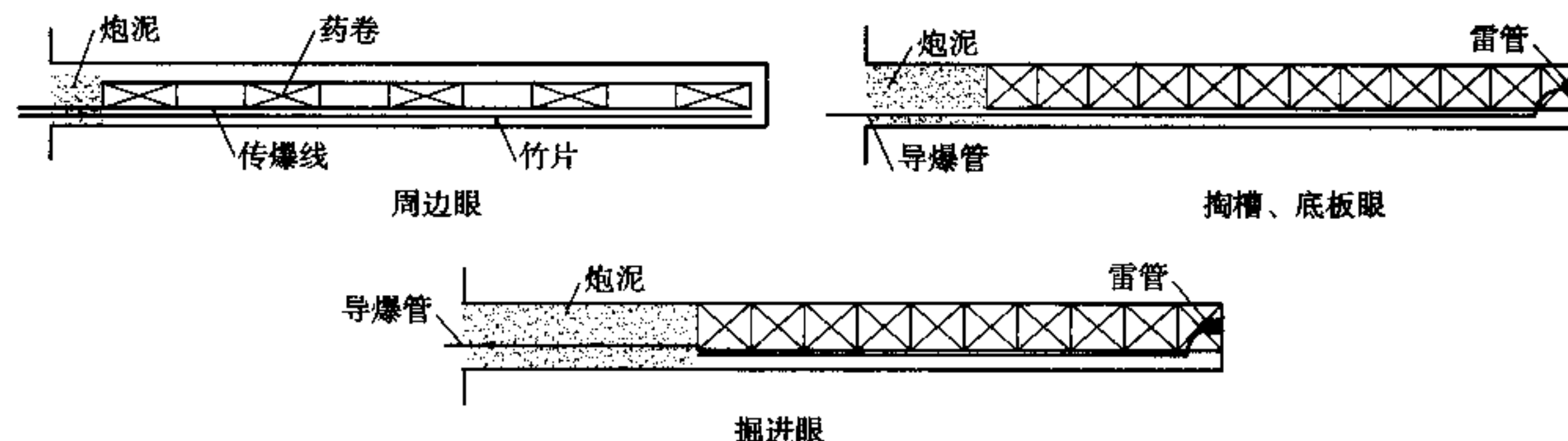


图 3 隧道爆破装药结构

(5) 爆破注意事项

①采用非电不对称起爆网路技术起爆连线时,要确保起爆顺序和每一炮孔都能起爆。

②选择合理的段间隔时间,以杜绝爆破振动波的叠加,一般选择段间隔 100ms 以上,应不小于 75ms。

③围岩强度不同,产状不同,爆破效果不一样,爆破震动强度也不一样,施工时需进行爆轰试验,取得可靠合理的爆破参数。爆破震动安全检算采用下式:

$$Q_m = K'R^3 \left(\frac{V}{K} \right)^{3/\alpha}$$

式中 Q_m ——最大一段允许用药量(kg);

V ——振动安全速度(cm/s);

R ——爆源中心到控制点的距离(m);

K ——与爆破技术、地震波传播途经介质的性质有关的系数,这里取 160;

α ——爆破振动衰减系数,这里取 1.8;

K' ——修正系数。

考虑不同的减振措施、不同的爆破临空面数量、以及在爆破施工实践中的爆破振动衰减,修正系数 K' 参照表 2 选取。

表 2 爆破振动衰减修正系数

序号	减振措施	K'	序号	减振措施	K'
1	中空眼减振	1.05 ~ 1.15	3	增加临空面	1.2 ~ 2.0
2	小直径炸药	1.15 ~ 1.25	4	周边密排空眼减震	1.2 ~ 1.8

爆破震动衰减系数随采取的减震措施而选取合理值,通过试爆确定。

3. 初期支护施工

(1) 格栅拱制作与安装

格栅拱集中制作,现场安装;制作过程中要注意钢板与钢筋连接的“T”型焊接部位的加工质量;单节格栅拱钢筋不宜搭接,必要时可采取闪光对焊;格栅拱分几段制作,闭合成环时闭合段应具有调节功能。

(2) 湿喷钢纤维混凝土施工

施工工艺流程见图 4。

喷头宜使用自动化机械手。喷头与受喷面的距离控制在 1 ~ 2m,角度以 90°最佳。喷射时喷头作顺时针旋转,一圈压半圈,纵向蛇行行进。

喷射时先补平坑洼处。喷射分段、分部、分层按初喷、复喷(间隔 4 ~ 6h)两次进行,初喷时先拱后墙,复喷时先墙后拱。

喷射工作风压:大容量湿喷机为 0.4 ~ 0.7MPa,中小容量湿喷机为 0.3 ~ 0.7MPa。

一次喷层厚度边墙为 7 ~ 15cm,拱部为 5 ~ 8cm,后一层喷射应在前一层终凝后进行。

严格筛选骨料,防止超径骨料混入,钢纤维应在搅拌中达到均匀分布,不能有结块现象,必要时可先将钢纤维浸泡 15min,单独搅拌至均匀散开后再掺入。准确控制水灰比。

有渗漏水的部位,喷射前应遵循“堵、集、引、排”相结合的原则进行处理。

4. 二次衬砌施工

二次衬砌采用自行液压组合门架式衬砌台车。台车长度以 9 ~ 12m 为宜,模板为定型组合钢模板。混凝土用商品混凝土,浇注时用泵送。

衬砌施工固定管理人员、操作人员,实行定岗定人,分工明确,做到对责任有可追溯性。加强管理,增强工种间的衔接配合,在施工过程中不允许出现相互推诿现象。

在混凝土浇注前技术人员做好设计、安全、质量等技术交底准备工作,让现场施工人员明白“做什么、怎么做、达到什么要求”。

各种预埋件、孔洞、挂钩技术交底时要明确其尺寸、数量、现场位置,预留孔洞大小,确定谁负责施工。

施工缝、变形缝、沉降缝处理做到止水带应用钢筋夹具夹牢,止水带在缝两侧嵌入混凝土宽度应尽量相等,误差不能超过 5cm。施工中应保护好止水带,不能将止水带拉裂或拉断。

模板台车在就位前,将模板表面的油污、混凝土“锅巴”清理干净,关模前将脱模剂涂刷在模板面上,刷后严禁弄脏模板。检查模板台车模板是否变形,如有变形,则用新模板将其替换。

根据测量中线、水平尺寸,调整台车模板宽度、高度,使台车模板外轮廓尺寸与设计的混凝土断面轮廓尺寸一致,然后将模板台车就位,由于模板台车在制作时已将断面尺寸放大 5cm,所以,模板台车就位时,不能再加大断面尺寸。

上好模板台车上所有钢筋支撑(拧紧或撑紧),在台车窗口、两头端头处加木撑,模板台车模板最低处

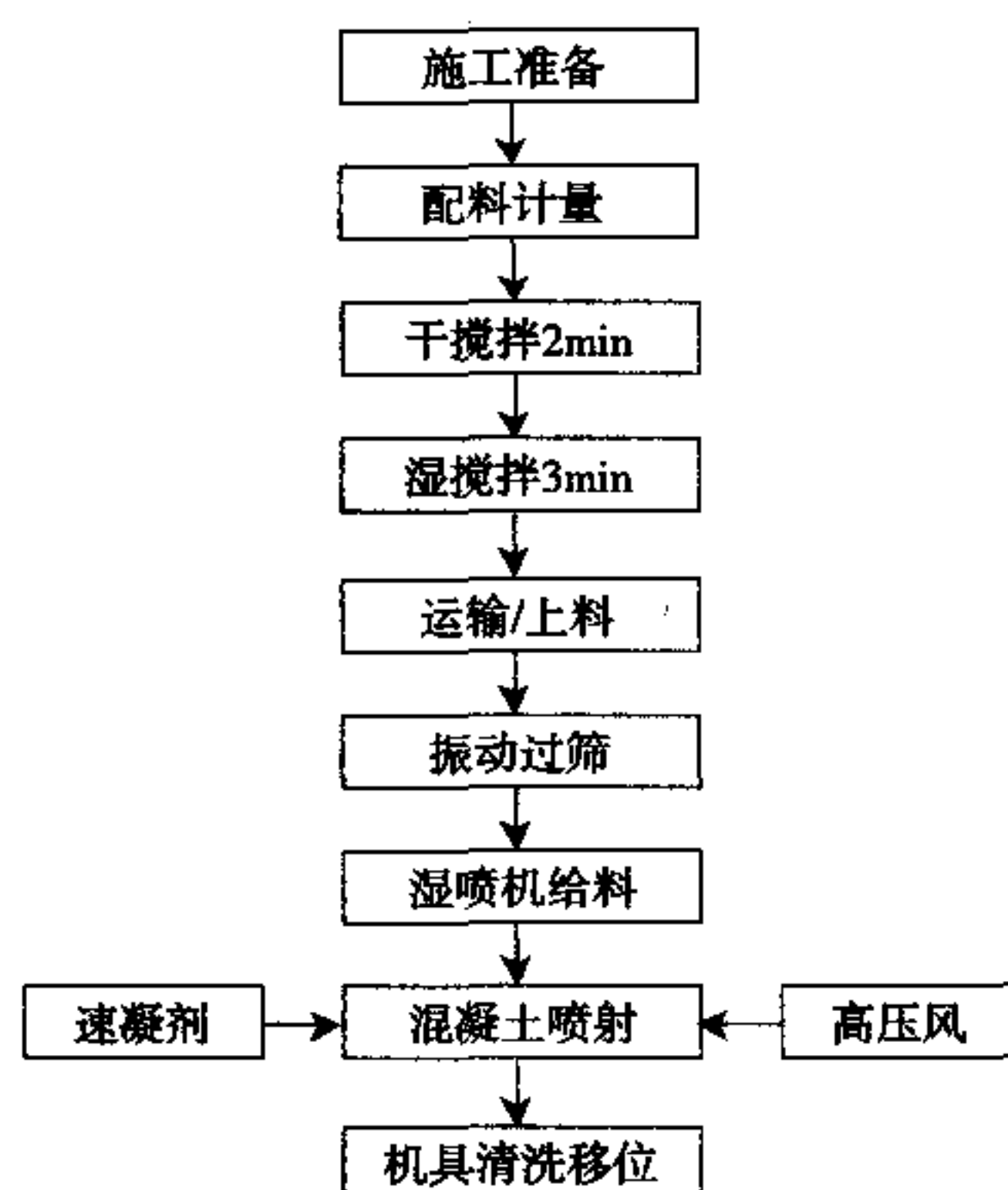


图 4 湿喷钢纤维混凝土工艺流程

(与矮边墙接缝处)加过河撑(撑在核心土上),过河撑间距为 1m,端头模板在断面环向每 30 ~ 50cm 钻孔,用 $\phi 25$ 以上的钢筋插进孔内作支撑。此外,对已破坏的防水板应在下模钢筋安装前补好。

所有模板之间的缝隙均应堵塞严密,保证混凝土浇注过程中不漏浆,为此,需紧固支撑,减小模板台车与已浇注混凝土之间的缝隙,挡头模制作应工整、平顺,无错台,减小挡头木模之间的缝隙。在浇注过程中,应随时检查,发现有漏浆的地方及时进行封堵。

上述诸步骤完成后,严格按照《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB50204—2002)第 4 节模板分项工程中的要求进行检查和验收。

5. 监控量测

- (1) 监测项目见表 3。
- (2) 监测点布置见图 5,测点数见表 4。
- (3) 量测频率见表 5。
- (4) 围岩稳定性应变基准见表 6。

表 3 监测项目

序号	监测项目	测试工具及仪表	备注
1	地表下沉	普通水准仪	必测
2	拱顶下沉	普通水准仪、钢尺	必测
3	边墙收敛	净空变位位移计	必测
4	爆破震速	测震仪	必测
5	锚杆轴力	应力计	选测
6	格栅拱应力	应力计	必测
7	临时支撑应力	应力计	必测
8	喷射混凝土与围岩接触压力	压力盒	选测
9	二衬钢筋应力	应力计	选测
10	二衬混凝土内应力	应力计	选测

表 4 测点布置

围岩级别	断面间距/m	测点数		
		水平收敛	拱顶下沉	表面位移
Ⅲ	10	5	5	2
Ⅱ	5	10	5	2

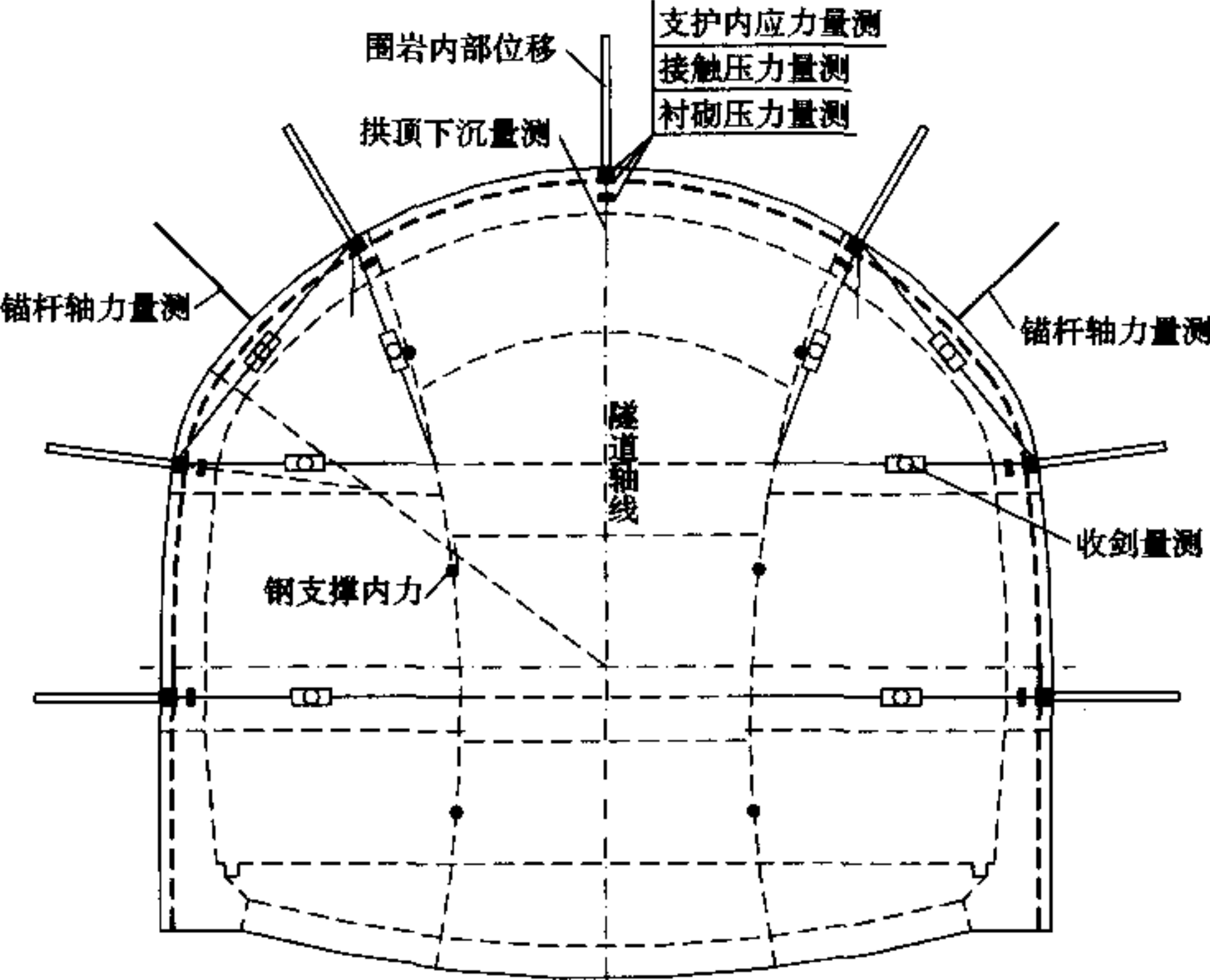


图 5 测点布置

表5 量测频率

位移速度/(mm·d ⁻¹)	与工作面距离	频率
>10	(0~1)D	1~2次/d
5~10	(1~2)D	1次/d
1~5	(2~5)D	1次/2d
<1	>5D	1次/周

表6 隧道周边相对位移值

%

围岩级别	不同覆盖厚度的相对位移值		
	<50m	50~100m	>300m
Ⅲ	0.20~0.80	0.60~1.60	1.00~3.00
Ⅱ	0.15~0.50	0.20~0.80	0.20~0.80

根据位移变化速率判别,当净空变化速率大于10mm/d时,应及时加强支护系统,必要时采用特殊措施,在确保工程安全的情况下再施工,当净空变化速率小于0.5mm/d时,则认为围岩基本稳定。

当实测位移超过表6所列允许值或位移无明显减小时,立即采取补救措施,以防止安全事故发生。

表6中所列数据为参考数据,可用于日常管理和控制。

六、机具设备(见表7)

表7 机具设备

序号	机具名称	规格/型号	单位	数量	备 注
1	变压器	600kVA	台	1	或2台350kVA
2	空压机	20m ³	台	2	开挖打眼
3	空压机	12m ³	台	1	喷射混凝土
4	多功能组合台架	自制	台	4	根据断面大小及施工组织设计配置
5	装载机	3m ³	台	2	出渣
6	反铲挖掘机	1.2m ³	台	1	勾齐头,出渣
7	自卸式汽车	15t	辆	12	出渣
8	自卸式汽车	5t	辆	2	材料设备周转
9	全断面模板台车	自制	台	1	根据断面类型配置
10	凿岩机	YT-28	台	60	开挖
11	强制制式搅拌机	350L	台	2	初期支护
12	注浆泵	30kW	台	2	锚杆注浆
13	对焊机	100A	台	1	
14	湿喷机	4~10m ³ /h	台	1	喷射混凝土
15	混凝土罐车	6m ³	辆	2	喷射混凝土
16	混凝土输送泵	75kW	台	2	

七、劳动组织(见表8)

表8 劳动组织

序号	工种类别	投入时间	高峰时人数	备 注
1	开挖工	开工时	48	开挖爆破
2	钢筋工	开工时	60(随工程进度逐步投入)	初支、二衬
3	木工	衬砌时	18	初支、二衬
4	混凝土工	衬砌时	30	二衬
5	喷射工	初支时	2	24小时对班
6	机修工	设备进场时	12	机械维修
7	司机	开工时	34(随工程进展逐渐增加)	24小时对班
8	架子工	初支开始后	24	初支、二衬
9	钳工	开工时	1	机械维修
10	对焊工	开工时	3	钢筋对焊
11	电工	开工时	3	值班
12	普工	开工时	24	配合其他工作
	合计		259	

八、质量要求

本工法除执行施工设计图纸和相应规范的有关技术要求外,尚应注意以下事项:

1. 严格控制二次衬砌面与核心开挖面的距离。一般衬砌面与全断面初期支护面的距离不超过 $1.5D$ (D 为洞室跨度),极限时不超过 $2D$,通过监控量测等信息手段及时进行动态控制,以充分保证工程质量和施工安全。
2. 格栅拱的连接要牢固,喷混凝土要密实,确保锚杆全粘结。
3. 因断面特大,全断面衬砌时要注意挡头模的加固,防止爆模。
4. 全断面衬砌浇灌混凝土时应控制两侧混凝土的高度差不超过 1m 。
5. 全断面台车在衬砌前应尽可能采取加固措施,衬砌台车门架上不得存放机具、材料,掉落的混凝土残渣及时清理,减小台车上的人为负荷。
6. 施工时设专职技术人员跟班作业,及时处理施工中发生的各种问题,严格按技术要求操作。抓好监测信息动态管理这一关键环节,及时调整施工方法,协调各工作面施工进度,使工程建设全面达到安全、优质、高效。

九、安全措施

1. 紧邻既有建筑的控制爆破除按工法所要求的进行爆破试验及控制措施外,施工中应严格控制单段装药量和雷管联线,当雷管段数不够时,可分多次起爆。
2. 充分保证初期支护的施工质量,准确把握开挖与衬砌各步序的关系,认真进行各工序的安全和质量检验,在各方面从根本上确保大断面隧道工程的施工安全。
3. 衬砌台车下部有行车通道,上部有衬砌作业人员,前方有开挖支护作业人员,因此,衬砌台车上必须认真牢固地悬挂安全防护网,并派专人定期和不定期检查,在两侧行车通道处悬挂交通标识,充分保证衬砌台车的照明需要。
4. 全面、及时、有效地进行监控量测,根据监控量测信息及时调整施工方案,协调各部的施工进度,使工程建设自始至终处于安全可控状态。

十、效益分析

本工法采用了双侧壁导洞预留核心岩柱的开挖方法,在特大断面浅埋隧道仍采用了全断面整体式台车衬砌,使城市浅埋、硬岩、环境复杂类的大跨隧道能采用暗挖法施工,不受场地、环境、天气变化及夜间施工限制,施工速度快、环境污染小、噪声低,对地面交通及周围居民生活影响小,能节约大量工程拆迁等间接投资。

其控制爆破技术全面满足了爆破振动速度在 $1.5 \sim 2.0\text{cm/s}$ 以内的要求,爆破影响围岩松动圈在 2m 以内,各项变形均未超过控制指标,对类似工程的爆破控制和既有建筑设施保护有重要指导意义。

本工法使导坑先行、先墙后拱、拱部跳槽开挖的设计方案优化为导坑先行、全断面衬砌方案,大大提高了施工进度,全面保证了工程质量和安全。

临江门车站工程应用本工法,工期提前 8.6 个月。竣工验收时,与会单位纷纷对本工程给予了高度评价,一致通过了竣工验收,工程质量等级优良,取得了良好的经济效益和社会效益。

十一、工程实例

重庆轻轨较新线一期工程临江门车站位于重庆市渝中区解放碑商业步行街下,全长 198m ,为浅埋硬岩特大断面隧道,开挖宽度 23.04m ,高度 20.885m ,开挖断面面积 420.96m^2 。工程位于市中心区,地表为商业步行街,两侧高层建筑林立,最近的世贸中心大厦与隧道边界水平距离仅 4.5m ,其基础位于隧道拱腰上。车站隧道穿过由 27 条既有人防洞组成的洞室群,构成了复杂的地质情况。隧道围岩基本为砂岩和砂质泥岩,属 II 级。隧道埋深仅 $10.5 \sim 14.5\text{m}$,其中地表覆土层厚 $4 \sim 6\text{m}$,拱顶围岩不能形成压力拱,围岩不具备自稳条件。

设计初期支护为 C25 级钢筋网喷钢纤维混凝土,厚 30cm ,钢筋格栅拱每 50cm 一道,临时支撑采用 20b 工字钢,每 50cm 一道,核心岩柱采用 5cm C20 级素喷混凝土临时支护,通过长 50cm 的 $\phi 22$ 药卷锚杆将临时支撑固定在核心岩柱上。锚杆采用长 3.5m 的 $\phi 25$ 中空注浆全粘结锚杆,拱部间距 $50\text{cm} \times 80\text{cm}$,

边墙间距 $80\text{cm} \times 100\text{cm}$ 。

二次衬砌采用双层 $\phi 22$ 钢筋网 C30 P8 混凝土, $\phi 22$ 主筋间距 16.7cm , 纵向钢筋为 $\phi 10$ 钢筋, 间距 20cm , 衬砌厚 80cm , 临近世贸中心大厦段钢筋网为四层。

该车站隧道 2001 年 8 月 10 日开工, 2003 年 3 月 27 日完工, 由于事先进行了详细的方案论证和风险分析, 采取了较多的安全保障措施, 整个工程施工非常顺利, 施工过程中未发生任何重大安全 and 质量事故, 工期提前 8.6 个月, 深得业主的赞赏, 工程平均进度折合成洞为 $9.9\text{m}/\text{月}$ 。

执笔: 唐果良 刘建国 邓青平 沈卫平 高 波