

富水砂质粉土层超浅埋小净距 市政隧道修建工法

(TGJGF-03·04-45)

中铁隧道集团有限公司

一、前言

长期以来,砂质粉土地层被视为暗挖隧道工程施工的禁区。中隧集团在杭州市解放路延伸工程的隧道施工中,针对富水砂质粉土层、浅埋、近距离双洞大跨分修暗挖隧道的特点,采用全断面预注浆、结合超前大管棚、降水等辅助措施,运用 CRD 工法进行左右洞开挖,以监控量测为基础,实行信息化施工,成功地解决了富水砂质粉土层的液化与管涌问题,有效防止了灾害性涌水、涌砂事故的发生,保证了隧道施工过程中周边敏感构筑物(水厂建筑群、沪杭铁路、古树群以及煤气和供水主管线)的安全。通过对该工程的注浆参数、降水方法、管棚施工工艺等方面的不断完善、发展和总结,形成了本工法。

二、工法特点

1. 采用全断面预注浆,应用分段限量控制注浆工艺,用 $\phi 32$ TSS 注浆管注浆,结合周边小导管形成有效的注浆加固体。
2. 根据地表建筑物敏感程度,采用不同型式的超前管棚。过古树群采用 $\phi 108$ 管棚,密排布孔;过沪杭铁路及过水厂配电房采用 $\phi 299$ 夯管大管棚。
3. 本工程采用深井降水结合洞内轻型井点降水的分次降水技术,解决了暗挖隧道施工过程中涌水涌砂问题,确保了周边敏感构筑物的安全。
4. 设备配套合理,可操作性强,适用范围广,对周边构筑影响小,安全可靠,工程成本较低。

三、适用范围

本工法适用于富水砂质粉土层的城市地下铁道、道路的小净距隧道,以及地下空间开发等采用浅埋暗挖法施工的小净距地下工程。

四、工艺原理

针对富水砂质粉土层的管涌与液化特性,采取堵排结合的措施,即全断面预注浆结合地表深井降水与洞内的轻型井点降水,在管棚超前强支护和周边小导管的联合保护下,采用 CRD 工法将整个工作面分成 6 步开挖,即“化大为小,步步成环,加强支护,及时监测”,以控制地表沉降,减弱对敏感构筑物的影响。

五、施工工艺流程

(一)关键工艺

关键工艺包括全断面预注浆工艺,管棚钻进成孔工艺,地表深井与洞内轻型井点降水工艺,分步开挖工艺。

(二)施工工艺流程(见图 1)

六、操作要点

(一)深井降水施工

1. 使用范围及意义

在地下水位较高、渗透系数为 $10 \sim 4\text{cm/s}$ 左右、隧道两侧 3 至 6m 范围内有布井条件时,用深井降水将地下水位降至二台阶底(即 8 至 11m),同时将隧道两侧的地下水补给切断。降水使土层的力学性质发生改变,提高土层的稳定性,防止和减缓涌砂、流砂,减少注浆加固圈厚度,降低注浆加固成本。

2. 设计参数

根据工期要求及地层条件,两侧各设置1~2排降水井,井间距5~9m,排距4m,呈梅花型布置。降水井直径不小于80cm,采用全滤管井管,井管直径为35cm,滤料厚度不小于20cm。

3. 技术要点

施工前进行降水试验,取得单井的涌水量及降深参数,求得渗透系数和影响半径,获得准确的降水布孔参数。

钻孔达到设计深度后用大泵冲洗泥浆,防止泥浆沉淀淤积。

下管后立即注入清水,稀释泥浆比重至1.08后再投入滤料。

洗井时必须将停留在孔内地层中的泥浆和井壁泥浆冲洗干净,在井周围形成良好的反滤层。洗井后,井内沉淀淤积不应上升或基本不上升。

滤料采用标准连续级配,使用前筛分检验不符合要求者必须进行缺失粒料补充。

(二)长管棚施工

1. 管棚设计参数的选择

管棚设置在开挖轮廓线外20~40cm,隧道拱部中轴线90°~120°范围内。管棚设计参数根据地表建筑物状况及线路平纵断面选择:

分段长一般为25~40m,以一次穿越一个建筑物单元为标准选取;棚管外插角取1°~2°;棚管间距一般为15~30cm,如周边环境要求采用限量注浆或注浆范围受限制时用小值。棚管通常采用 $\phi 108$ 无缝钢管。有敏感建筑地段采用 $\phi 229$ 夯管。

2. 施工准备

设置临时管棚套拱,套拱长2~3m,严格按设计位置和方向预置管棚导向管。对于 $\phi 229$ 夯管应设置土质夯管平台,其角度与设计角度一致。

3. 施工技术要点

$\phi 108$ 管棚钻孔时为解决坍孔及下管难的问题需采用跟管钻进;钻进过程中为防止涌水流砂,采用“钻进超前3~5m,冲水取土在后”的干钻工艺;在棚管上设置单向溢浆孔,以利于成孔后分段注浆。

$\phi 229$ 管棚夯管时采用橡胶布帘对管口进行压封止水,以防止夯管过程中涌水流砂;夯管时采用后取土技术,即取土滞后夯管进度2~3m。夯管壁上间隔设置 $\phi 25$ 无缝钢管,实现夯管过程中的跟踪注浆,以补偿夯管振动地层液化引起的地表沉降。

(三)全断面TSS管超前预注浆施工

1. 方案设计

(1)总体方案:根据CRD工法分步开挖步距要求,全断面一次注浆长度为5m,开挖2.5m,预留2.5m作下一段注浆的止浆墙。做法是:通过GB $\phi 32$ TSS导管采用分段后退式注浆。

(2)注浆加固范围包括开挖面及开挖外周边加固圈。周边加固圈厚度根据管棚及地下水位情况设定:无超前管棚,水头高度超过4m时采用强加固,周边加固圈厚度为一倍洞径;有超前管棚,水头高度超过4m时采用强加固,周边加固圈厚度为2~3m;有超前管棚,水头高度低于4m时采用弱加固,周边加固

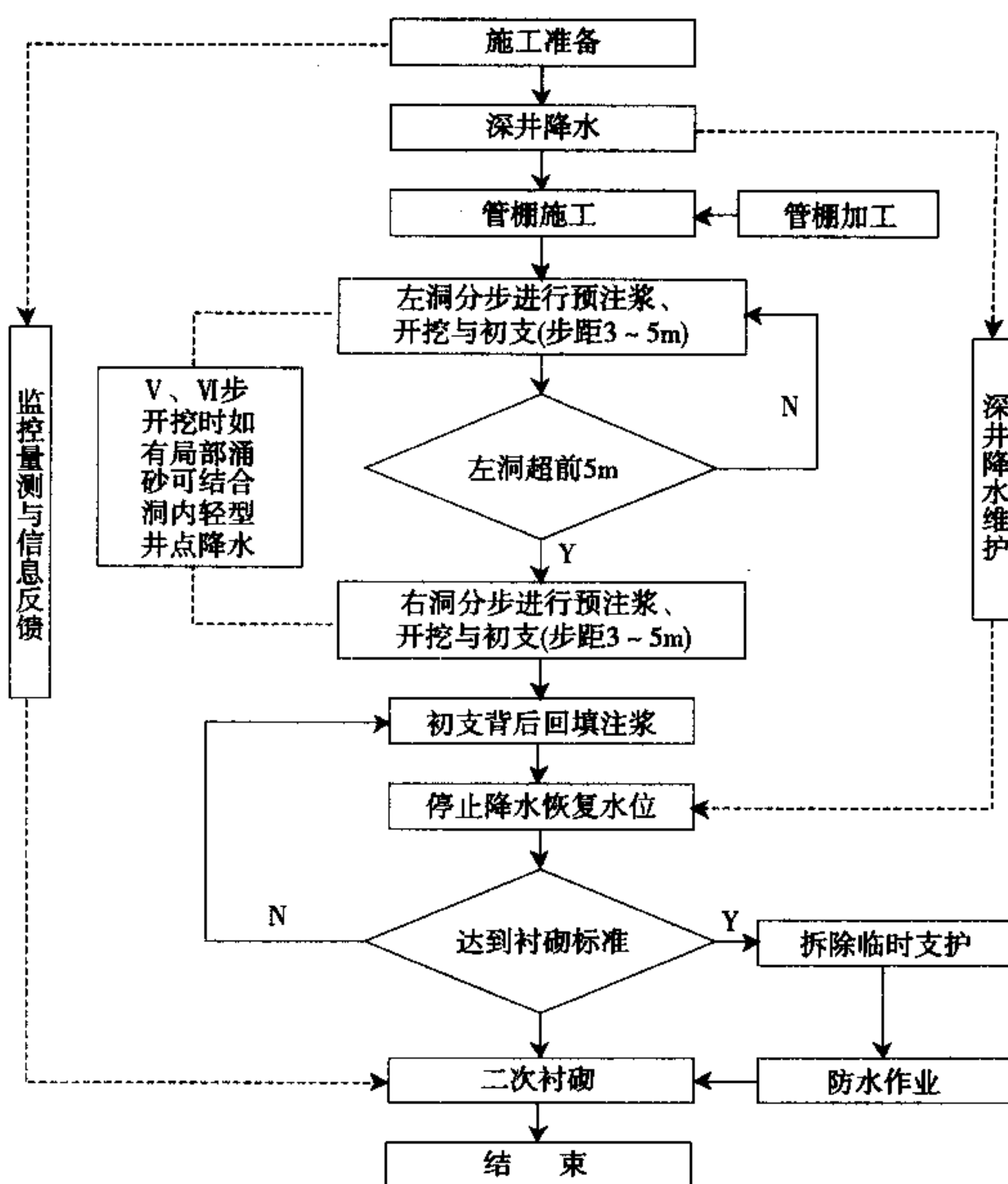


图1 施工工艺流程

圈厚度为 1m;周边环境要求进行限量注浆时,可采用密排管棚,周边加固圈厚度为 0.2~0.5m。

(3)浆液扩散半径:通常情况下采用 0.6m,有限量注浆要求时采用 0.3m。

(4)注浆孔间距及布置:周边孔根据地表建筑状况间距分别设定为 10cm、30cm,外插角 18°~22°;内排孔根据终孔交圈理论布设采用相对坐标法进行设计。

(5)主要注浆参数:注浆速度 15~35L/min;浆液凝胶时间 0.5~3min;注浆终压 0.8~1.2MPa;注浆分段长 0.6m~0.3m,采用限量注浆时取小值。

(6)分段注浆量:注浆采用分段后退式注浆,注浆量采用下式进行计算

$$Q = \pi R^2 h n a (1 + \beta)$$

式中 Q ——分段注浆量(m^3);

R ——浆液扩散半径(m);

h ——注浆段长(m);

n ——地层空隙率;

a ——地层空隙充填率;

β ——浆液损失率(10%~30%)。

2. 施工准备

(1)封闭工作面 喷混凝土封闭,厚度不小于 20cm。

(2)施工材料准备 包括 TSS 管、芯管、止浆塞和注浆材料及添加剂。

(3)抢险材料的准备 主要是防涌材料,如棉纱、编织袋、方木、喷混凝土料等。

3. 材料选择

(1)超细型浆材 适合快速施工砂质粉土层注浆使用。超细水泥—水玻璃浆材可注性好,凝胶时间可控;超细型 TGRM 浆材,对耐久性要求较高地段采用。

(2)普通水泥单液浆 用于发生涌砂流砂时对损失地层的补偿性注浆。

4. 钻孔

(1)钻孔方式 采用风钻引孔方式或直接将注浆管顶入。如土层不均一存在块石并有涌砂时,则先注浆后引孔。

(2)定位方法 按设计开孔位置及终孔位置,采用相对坐标法对钻杆进行定位定向。

(3)废孔处理 采取“废一补二”的补救措施。

(4)限量排砂 钻进中对排砂量进行评估,如出现涌砂,或停止钻进后仍有水和砂流出,采取注浆回补措施。

5. 安设注浆管

钻孔结束后,立即将 TSS 钢管顶入。顶进距孔口 1m 左右时,用棉纱和水泥砂浆在注浆管管口绕成纺锤形,并用风钻顶紧,使之与孔口密封严密。

6. 注浆作业

采取后退式分段注浆工艺。钻孔、注浆顺序:先周边孔,后内圈孔;先下后上。周边孔采用三序孔方式,内圈孔采用两序孔方式。注浆结束标准:周边孔采用定量与定压的控制方法,内圈孔采用定量控制法。

(四)CRD 工法施工

1. 施工步骤(见图 2)

施工时左右洞工作面拉开间距,设定左洞先行,右洞应滞后左洞 15~20m,右洞 I 步开挖应在左洞同一工作面的 IV 步完成后进行。如果左右洞上方建筑物的不均匀沉降要求较严时,其施工间距减小至 5m 以内,左右洞基本上对称并进,以减小由于滞后开挖引起的不均匀沉降。

2. 设备配套的安排

为减少设备投入量,在中隔墙临时支撑设置横通道,横通道每 10~15m 设置 1 条,断面为 1.5m×2m,以便各步序间喷混凝土管、注浆管、风管、水管的共用与人员来往。

3. 开挖施工技术要点

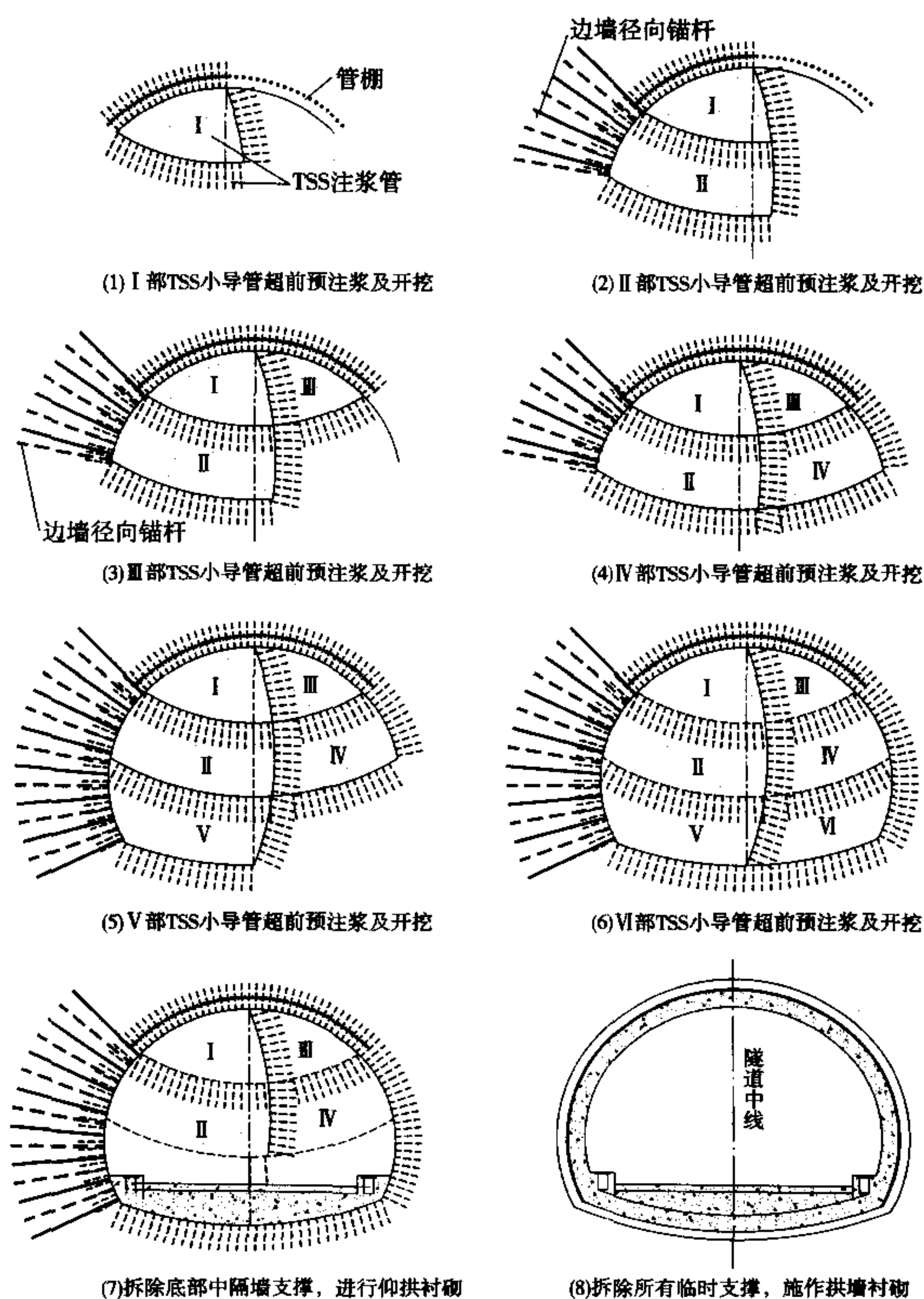


图2 单洞 CRD 工法步骤

每次开挖前打设不少于 3 个检查孔, 检查完成后进行压浆封闭。

开挖采用环形开挖, 步距 0.5m, 严禁超挖, 成型后立即立拱、挂网、喷混凝土, 封闭工作面。后步注浆时, 前部不得开挖, 以防浆液泄漏。

开挖中现场备齐棉纱、编织袋、木楔等抢险物资。

4. 支护施工技术要点

II、V 步外侧墙锚杆按设计进行施作, 并与拱架焊接在一起, 使之达到整体支护效果。

安装拱架时, 先清理干净拱脚处的虚渣, 安装后用预制混凝土块将拱脚垫实, 并用楔形木块将拱脚角钢与垫块间塞实, 严禁在拱脚下填土、砂等杂物。拱架间采用连接筋连接, 以增加拱架之间的整体效果。

锚杆注浆在喷混凝土后 12~24h 内完成, 喷混凝土分三层进行, 不得利用钢筋网进行堆喷, 仰拱喷混凝土前, 对底部虚渣和回弹料进行彻底清理, 喷混凝土采用湿喷或潮喷, 不得采用干喷。

将拱脚、喷混凝土等作为严格自检项目, 由质检工程师旁站监督。

5. 拆除临时支护

拆除临时支护前, 先停止降水, 恢复水位。如果初支有渗水或涌砂, 进行初支背后补充注浆, 直到无地下水渗出为止;

首先拆除 V、VI 步之间的临时竖向拱架(支柱),拆除长度为 1 个衬砌段长。然后清底并设置底部防水层和浇筑仰拱混凝土。最后拆除本段其它临时支护,施作防水层,模板台车就位,浇筑钢筋混凝土衬砌。拆除临时支护时,应进行全过程监测。

6. 关联工序

V ~ VI 步开挖时如有注浆盲区及局部涌砂现象,需立即喷混凝土封闭,并进行补充注浆,或进行洞内轻型井点降水作业。

(五)洞内轻型井点降水

针对 V ~ VI 步开挖可能存在的注浆盲区及局部涌砂现象,必要时隧道底部布设轻型井点,适当降低地下水位,以保证隧道开挖的安全。降水应按照“适量、有效”的原则进行。

1. 井点布置在距 II、IV 步开挖面 5 ~ 10m 范围内靠外侧,共二排,每排 5 ~ 7 管。

2. 井管采用 $\phi 30$ 厚壁硬质 PVC 管,管长 8m,开孔长度 6m,孔径 6mm,孔间距 10cm,呈梅花形布设。管外依次绑绕厚 3 ~ 5cm 的棕皮和两层 80 的尼龙网。

3. 在 II、IV 步临时仰拱喷混凝土时,预设 $\phi 50$ 的钢管作井管的插入孔。井管插入时采用水冲法,但应采用棉纱封口,以限制排砂量。

(六)防水层施工

防水层施工前对初期支护进行检查和整理,使之达到二级防水要求,表面平整无尖锐突出物。防水层在专用作业台架上采用无钉铺设,进度超前衬砌 1 个循环。铺设完成后进行充气检查和整体质量检查,确保达到设计质量要求。对已铺设的防水层进行严格保护,如果不慎破坏,须及时修补。

(七)二次衬砌施工

采用整体模板台车,拱墙一次浇注成型。模板台车就位时两侧轨枕应加密,就位后预留 2cm 的沉降量。衬砌前应对初支渗漏水进行测试、评估和处理,使隧道每延 m 渗水量小于 $0.5\text{m}^3/\text{d}$ 。衬砌分段应充分考虑临时支护拆除的分段与安全保证。

(八)监控量测

监控量测数据是信息化施工的信息源,通过监测提供支护结构受力与变形、地表沉降与土层位移、地下水位、管线与建筑物沉降等数据,以便随时调整与优化施工工艺和技术参数。主要监测项目见表 1。

表 1 主要监测项目

序号	监测项目	监测主要元器件及仪器	要 求
1	地表沉降	精密水准仪、钢钢尺	必测,测点间距 3 ~ 8m
2	拱顶下沉	精密水准仪、挂尺	必测,断面间距 5 ~ 10m
3	净空收敛	坑道收敛仪	必测,断面间距 5 ~ 10m
4	水位观察	水位管、水位仪	选测,根据具体情况定
5	土体位移	沉降标、测斜管、测斜仪	选测,根据具体情况定
6	拱架支护内力	钢筋计、频率接收仪	必测,1 ~ 3 个断面
7	土压力	压力盒、频率接收仪	必测,1 ~ 3 个断面
8	管线及建筑物沉降	精密水准仪、钢钢尺	必测,每栋 4 ~ 12 个测点

监测控制标准:参照《铁路隧道喷锚构筑法施工规范》、《铁路隧道新奥法施工指南》、《建筑基坑工程技术规范》、《建筑地基基础设计规范》。与设计 and 市政管线单位进行协商科学制定并进行动态管理。

(九)敏感建筑物的跟踪注浆技术

对于敏感建筑物应与业主、设计和主管单位充分协商后制定沉降或不均匀沉降控制标准,在施工过程中进行重点全程监测,并通过监测资料分析提出对方案的调整和优化建议。

配备必要的跟踪注浆设备,随时准备对建筑物进行跟踪注浆,以控制沉降量和确保建筑物的安全。

七、机具设备(见表 2)

八、组织管理模式及劳动组织

(一)组织管理模式

表2 机具设备(按一个工作面计)

序号	机械或设备名称	规格型号	数 量	生产能力	备注
1	风钻	YT-28	15 台		隧道开挖
2	风镐	G10A	24 台		隧道开挖
3	内燃空压机	VY-12/7	2 台	12m³/min	隧道开挖
4	电动空压机	4L-20/8	1 台	20m³/min	隧道开挖
5	混凝土搅拌机	强制式	1 台	350L	喷混凝土拌料
6	混凝土喷射机	潮式或湿式	3 台	5m³/h	隧道支护
7	混凝土运输车	TSB-6	4 台	6m³	隧道开挖
8	浆液搅拌机	UJ200 200L	4 台		注浆制浆
9	通风机	DKJ60-NO.6	2 台		隧道通风
10	模板台车	自制	2 台	8m	二次衬砌
11	混凝土输送泵		1 台		二次衬砌
12	潜水泵	80m³/d 扬程 25m	50 台		降排水
14	抽水机	ZGC-5/6	4 台	扬程 90m	降排水
15	注浆泵	KBY-50/70	5 台		注浆
16	回转钻机	MK-5D	2 台	40kW	管棚
17	地质钻机	200 型	4 台		降水
18	真空泵		6 组		轻型降水
19	挖掘机		2 台		隧道开挖
20	自卸汽车		3 台		隧道开挖
21	电焊机	SX1-300	4 台		钢筋加工
22	作业台架		2 台	6m	防水作业

由于工程难度大,工序交叉复杂,为了确保施工安全和施工质量,需建立由设计、监理、业主、施工、科研等单位组成的动态设计和信息化施工管理组织,其模式见图3。

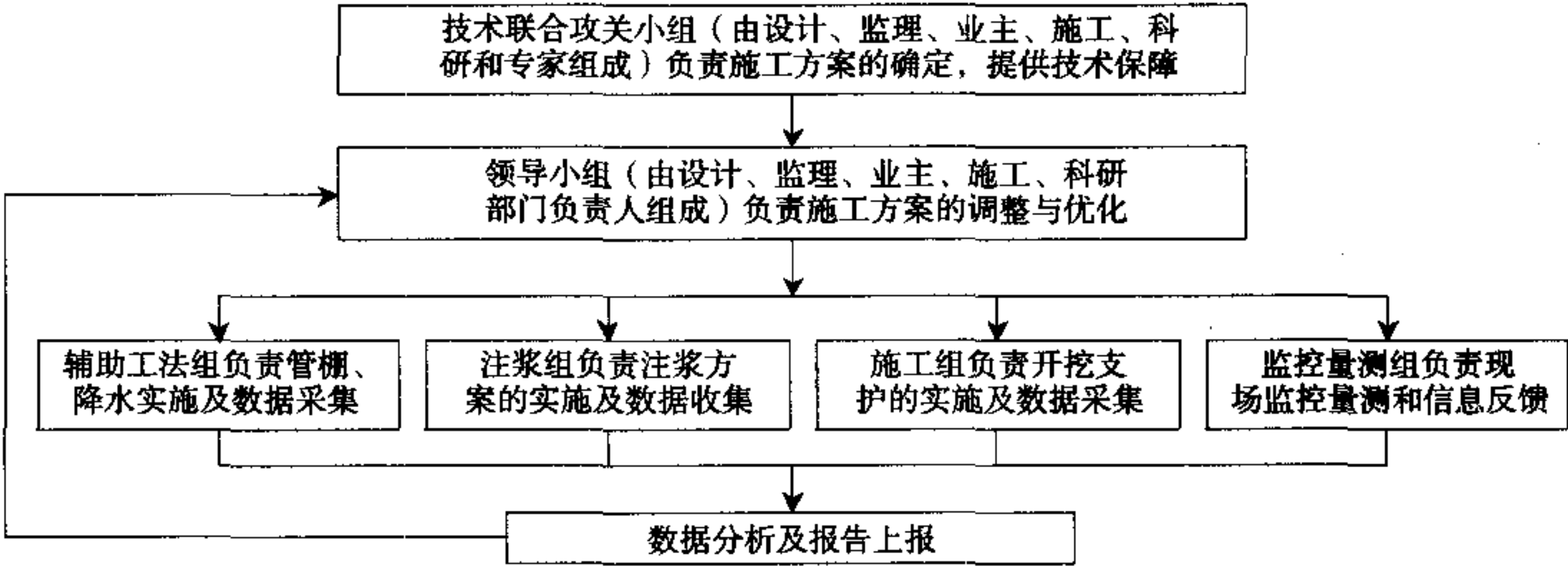


图3 施工组织管理模式

(二)劳动组织(见表3)

表3 劳动组织(单工作面)

序号	工 别	单班人数	作业班次	合计人数	备注
1	测量与监测	7	1	7	
2	开挖支护	6	3	18	
3	出渣	4	3	12	
4	防水与衬砌	20	2	40	
5	注浆	8	2	16	
6	降水(地表/洞内)	5/6	2	22	
7	管棚	5	2	10	
8	加工班	10	2	20	加工钢材
9	电工	1	3	3	
10	机修工	2	3	6	
总 计				154	

九、质量标准及保证措施

(一)质量标准

1. 管棚定位允许误差 $\leq \pm 1\text{cm}$,钻进方向偏差 $<1^\circ$ 。
2. 注浆钻孔开孔允许误差 $\leq \pm 1\text{cm}$,钻进方向偏差 $<2^\circ$ 。
3. 注浆钻孔与下管深度不得小于设计长度,也不得超过设计长度 10cm 。
4. 检查孔钻进过程中排出的土砂中应有浆液的胶凝体,检查孔钻孔结束后,将钻孔放置一段时间,观察检查孔中没有涌水、涌砂现象则为合格。
5. 降水抽水稳定后的含泥砂量应低于规范规定值。
6. 开挖各分步拉开间距不得超过 5m ,开挖进尺误差不得大于 10cm 。

(二)质量保证措施

局部地层加固效果较差,开挖时出现少量的涌砂涌水采取的技术措施包括:

1. 一般采用 $\phi 100$ 的注浆钢管引水,然后采取注浆封堵法进行处理。
2. 根据周边地层情况选择合适的管棚、降水辅助措施,弥补注浆的不均匀性。
3. 派专职技术人员进行管棚、降水、注浆及开挖现场值班,结合监测信息对不同工序中存在的问题进行全面分析,提出相应的对策。
4. 制定详细而周到的临时支护拆除及衬砌对策,以应对拆除过程中的支护异常情况。

十、技术经济分析

本工法对于我国东南地区有广泛砂质粉土地层的城市发展和规划建设具有一定借鉴意义,其社会效益和经济意义是显著的。

在富水砂质粉土层施做城市道路隧道采用浅埋暗挖法其工程成本较采用盾构法相对较低。

十一、工程实例

杭州市解放路延伸线工程为杭州市由“西湖时代”向“钱江时代”发展的配套工程,是连接西湖城区与钱江新城的标志性工程之一。设计上采用暗挖隧道有4段,分别是古樟群与环城东路段、沪杭铁路段、水厂配电室段及凯旋路段,共计长 242m ,隧道最小覆土厚度仅有 2.6m 。由于沿线各种管线、名木古树、沪杭铁路及配电房等建筑物的保护需要,施工难度非常大。

隧道穿越的地层主要为厚度不一的砂质粉土层、薄层粉细砂及淤泥层以及原沼泽的人工填层,地质状况复杂。隧道穿越地层主要为潜水,赋存于场区浅部人工填土及其下部的粉、砂性土层内,富水性和透水性具有各向异性,含水层厚度在 $16.5 \sim 21.8\text{m}$,多为微咸水,水化学类型为 $\text{CO}_3 \text{ Cl} - \text{Na}$ 型,渗透系数一般在 $10 \sim 4\text{cm/s}$ 数量级左右。受周边河水的影响,地下水位埋藏较浅,一般 $1.0 \sim 1.5\text{m}$ 。

暗挖段设计采用小间距分修双洞隧道,隧道单洞断面跨度 9.5m ,双洞净间距最小仅 0.8m ,左右两洞紧紧相连。隧道洞身为C30级钢筋混凝土衬砌,拱部采用 $\phi 108$ 管棚进行超前预支护,并进行全断面TSS注浆(压注MC超细水泥—水玻璃双液浆)超前预加固地层。初期支护为厚 30cm (跨铁路段拱墙为 35cm)的C30级喷钢纤维混凝土、间距 0.5m 的格栅钢架和外侧边墙系统锚杆联合支护。临时支护采用C20级素喷混凝土和间距 0.5m 格栅钢架联合支护。

过铁路暗挖段:为确保铁路运营的安全,地表用便桥对铁路轨道进行加固,洞内用 $\phi 299$ 密排管棚(间距 30cm)超前支护,地层用超细型TGRM浆液注浆加固,结合深井降水进行施工,同时进行相应的地表铁路轨道加固。

过古树暗挖段:为控制拱部的注浆量,减少对古树的影响,采用间距 15cm 的 $\phi 108$ 密排管棚,拱部用弱注浆,加固开挖线外仅 0.4m 范围,结合深井降水和洞内轻型井点降水进行施工。

过配电房段:地表隧道两侧设置旋喷桩止水帷幕,洞内采用 $\phi 299$ 的密排管棚(间距 30cm),结合自流井降水和跟踪注浆进行施工。制定了严格的沉降控制标准和周密的跟踪注浆方案,在施工过程中通过监测信息指导施工,采用先进的二重管跟踪注浆技术进行纠偏和控制沉降,确保了配电房的正常运转。

该工程于2002年9月开工,2004年12月主体工程完工。安全通过了水厂配电房敏感地段,确保了水厂的正常运营;顺利通过了铁路段的施工,没有对铁路运输产生不良影响;成功通过了过古树段的隧道施工,古树生长势态旺盛而未受任何影响;隧道暗挖施工期间保证了环城东路和凯旋路正常交通。

执笔:吴全立 刘招伟 张文强 耿伟 朱亮来