

论大断面浅埋隧道的施工方法

吴 成 三

一、前 言

铁路双线隧道越来越多,又为了避免大量拆迁,节省用地和环境保护,近年来,有时用隧道代替立交桥,然后填土恢复原状,隧道的埋深不一,进出口地段往往覆盖很薄,采用明挖法或埋挖法施工,经常是个争论问题,暗挖法也有全断面,半断面和分部之分,究竟选用何种方案,因为各隧道通过的围岩不同,地下水位不同,以及施工单位现有的设备和施工期限,很难一概而论,但根据多年来实践中的经验教训不论采用何种施工方法,必须突出一个特点,即其可靠性亦可说是安全度(sicherheit)双线隧道宽度较大,围岩的自承性差,容易引起坍方。处理一次坍方,平均约需40天左右,同时还容易引起伤亡事故。

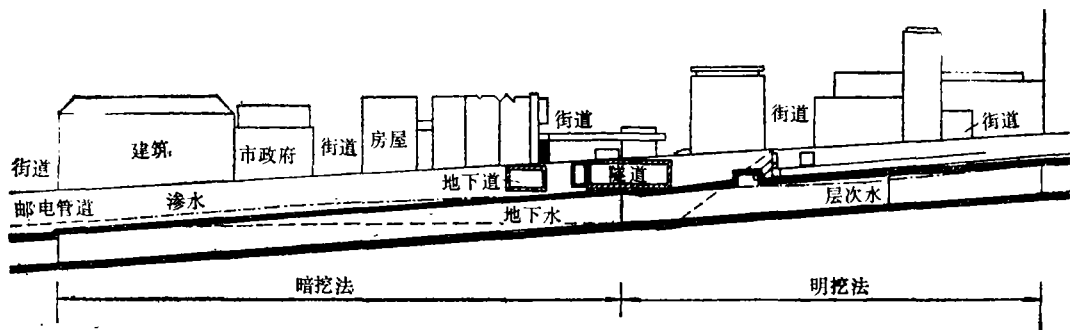
二、国内外隧道施工经验

兹举目前正在施工中或不久前完工的实例,提供评议和决策时参考。

(一) 联邦德国经验

1. 斯图加特铁路隧道(S-Bahn)〔1〕

在总站与城市中心之间,在两条街道下面修建一座隧道(图一),一条街的两侧多为6层楼的老商店,在另外一条街的两侧,多为新建筑隧道长516m,覆盖层为8~10m虽然如此,按照包商的特别建议,其中长度的2/3采用暗挖法通过,在接着的加宽地段直达城市中心则采用明挖法施工。暗挖地段于1972年11月开工,首先开挖上部(拱部),高4.75m,宽13.2m,

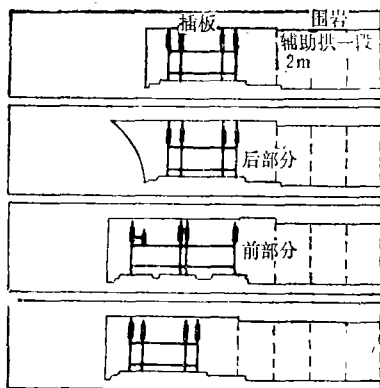


图一 隧道纵剖面, 322m用暗挖法, 其余194m采用明挖法施工, 纵坡28%。

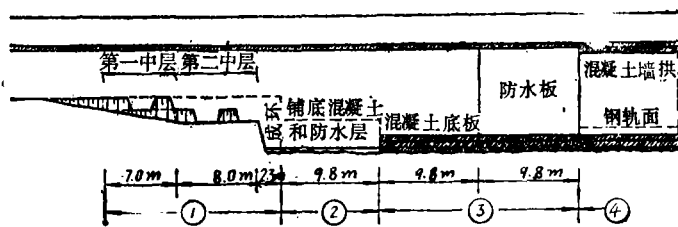
用钢筋混凝土辅助拱做为隧道外层衬砌, 并利用插板(MeSServortrieb)超前支护(图二)其中新颖部分是用液压走行支架(Schreitgerciff)将插板用压打进围岩之中, 形成半圆

板棚,插板用钢制成,宽23cm长7m液压支架由两个分开的固定框架组成,用气压机具将插板分成几步打入围岩之中,打进深度约为1m,开挖后,液压支架随着前移,并灌注支架后面的辅助拱,平均日掘进约1.3m随着上部掘进(图三)对离隧道很近建筑物的基础土层进行压浆(图四),由于采用这种措施,附近的建筑物未出现沉落情况,但用插板掘进在另一条街道表面出现很清楚的沉落现象(图五),其数值为预计的10倍街道表面沉落大于50cm,

特别表现在隧道中线部位,因此须对街道路面和管线系统进行更新;沉落的原因是覆盖土层比较松散和插板的工作方法不当。不到一年的时间,将隧道上部打通,接着打边墙锚杆,进行下部开挖和灌注内层混凝土,仅在很短段落内进行工作,暴露开挖岩面不准大于17m隧道内层衬砌为钢筋混凝土,厚40cm分段灌注,每段长度为10m。



图二 插板掘进时,用的液压走行支架,带有前进和后退设备行程约加1m,接着灌注含辅助拱,插板一端在辅助拱上



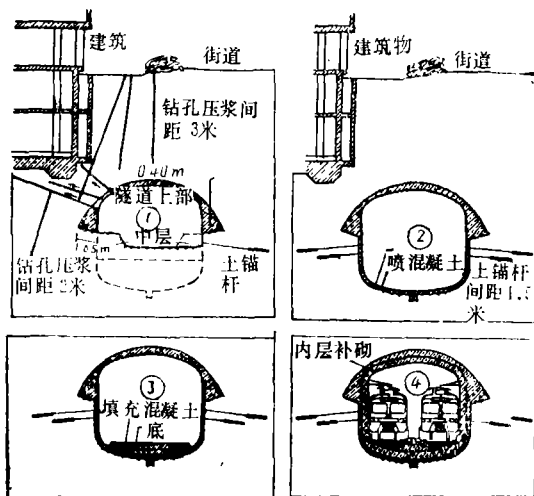
图三 段步工序

由于围岩变化,必须经常变换开挖方法,防水措施和灌注混凝土工作,工程进度非常缓慢,延长了工期,用29个月时间仅完成隧道主体工程322m,月进度平均为11m,在第二阶段掘进时和灌注内层衬砌,能将沉落控制在10mm,因此街道表面未继续沉落,沿着街道的建筑物未受损害。

引道和明挖地段于1972年7月开工,利用汉堡经验,部分加固地层,部分打钢桩护壁并在桩背用锚杆张拉,施工进度比暗挖法快的多,这部分隧道已在1973年7月完工,用11个月时间完成194m,平均月进度18m,为暗挖法的1.6倍。

2. 布尔格贝尔格隧道 (Burgberg+unnee) [2]

这是满海母到斯图加特高速铁路中正在施工中一座双线隧道为了避免深而宽的路堑,本段线路采用隧道通过全长1115m,其中一段长535m,由于覆盖层薄,最厚为15m,采用明挖法施工,其余580m采用暗挖法施工(图六)。为了取



图四

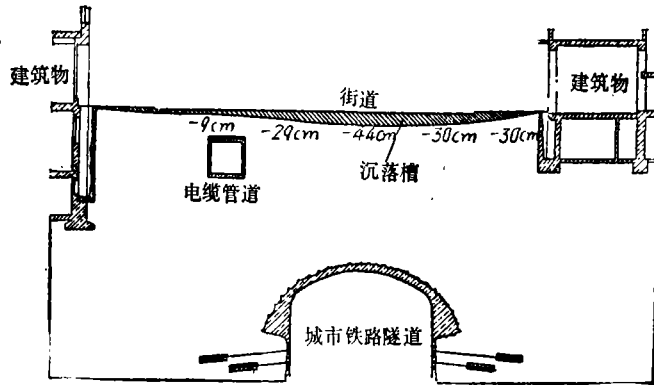
- 1、2、开挖中层和底部
- 3、4、灌注内层衬砌随着隧道掘进对附近建筑物基础地层从街道表面和隧道进行压浆。

得经验, 1955年从隧道东口做试验洞。

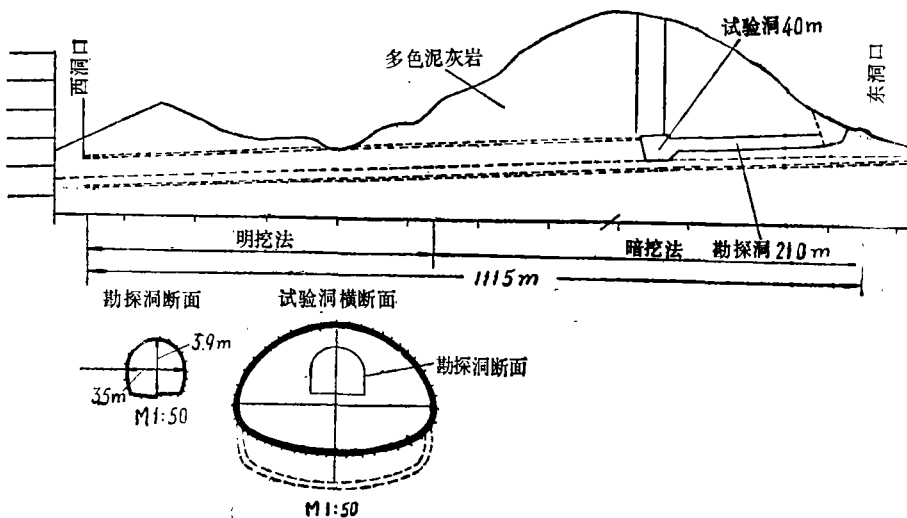
暗挖部分按照新奥法原则进行施工鉴于断面大和实际围岩情况采用部分开挖, 参照试验洞取得的经验, 对隧道上部根据围岩情况采用全断面掘进, 在不利的情况下则留核心土体, 对上部的底部, 原则上应用底拱临时成环 (图七), 开挖中层时再将它挖掉, 在拱顶部分布置泄水孔以减轻水压力, 对临时支护除喷锚外还采用插板超前支护。

对拱部与边墙连接进行特别设计, 既不能干扰开挖, 又形成一个完好的接头, 减少了开挖中层的危险。

采用隧道掘进机 (Tunneltagger) 开挖, 进尺度深度为0.8~1.0m随着掘进, 同时采用网喷和钢拱支护。



图五 隧道掘进时, 地表沉降情况

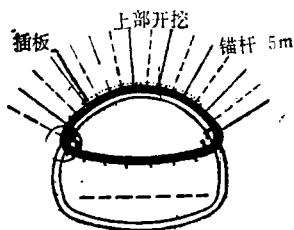


图六 布尔格贝尔格隧道

本隧道通过多色泥灰岩 (Bunt-Mergel), 这种岩石可用作制砖的原材料。地下水位在隧道底部以下, 拱上部分可能有渗水或层次间的地下水。

掘进后, 利用模板台车灌注内层混凝土, 每节长8.8m, 由于地下水对混凝土无侵蚀性, 采用防水混凝土衬砌, 不用中间防水板。全断面一次灌成, 不留水平工作缝。

在明挖地段, 同样采用防水混凝土结构, 厚为50cm, 不用防水层。施工期间, 公路绕行, 完工后, 恢复原状。



图七 临时成环和接头

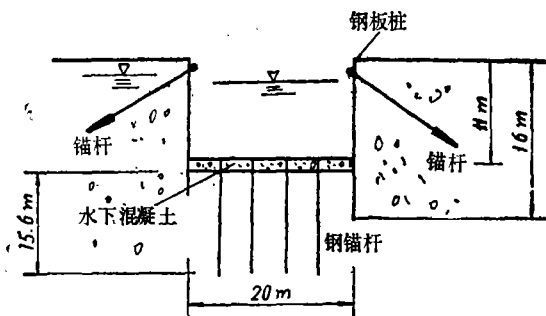
3. 波夫斯特伯格 (Pringsbergtunnel) [3]

也是一条满海母到斯图加特高速铁路中双线隧道，全长5.4公里。已于1985年建成。因为覆盖层薄，全部采用明挖法施工，由于地下水对混凝土无侵蚀性，采用防水混凝土衬砌，放弃原设计的防水层，节省大量资金。详见1982年8月份《铁道标准设计通讯》

4. 浮尔斯特 (Forsferfuhnel)

这是满海母到斯图加特高速铁路中的第三条采用明挖法施工的双线隧道。全长1700m，隧道从6车道的高速公路下面通过。附近人烟稠密，是新建铁路最有趣味的一项建筑，地下水位

距地表仅1.5m~2.5m，隧道全部埋于地下水中，穿过砂、卵石层，最引人注目的是如何优选施工方法，避免降水措施，经研究决定采用明挖法施工，首先打钢板桩做围堰，桩长16m，在地下水位以上用锚杆张拉桩顶（图八），以增强其稳定度，然后用门式抓斗在水中挖砂石，共挖走50万m³，其中大部分利用做混凝土的集料。



图八 施工步骤

下步工作是利用浮船将约长16m的钢锚杆打进基底，以防基底涌起，然后灌注水下混凝土，(B25)厚1m进行封底，等凝固后，将水抽干，接着在这个“干船坞”中修建隧道。由于地下水对混凝土无侵蚀性，采用整体式防水混凝土结构(B35)，不用防水层，每节长8.8m，接缝用止水带。

最后将隧道背后用土填实，拨去钢板桩，再将隧道以上部分填土压实，并栽种植物进行绿化，工程造价8,500万马克。

5. 爱伸地下道〔4〕

爱伸(Essen)三段地下铁道，均用新奥法施工，但由于其地质条件不同，开挖方法亦不相同。

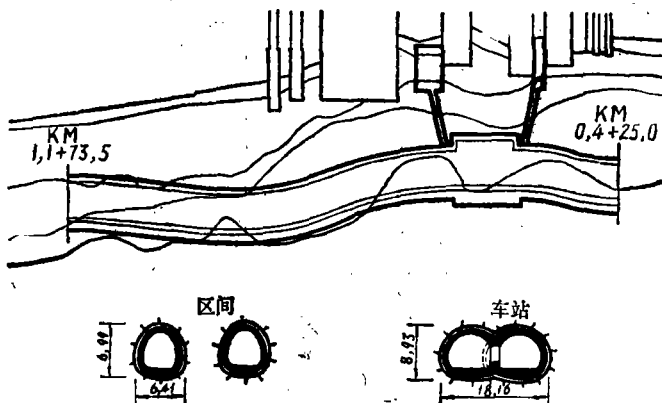
(1) 第一段

隧道通过白垩纪的胶结坚实的泥灰岩地层，围岩层次倾向线路60—70°，偏压很大，泥灰岩以上的为1—5m厚的风化洪积层，在区间采用两个单线隧道，在车站部位采用一个双线断面（图九）。

因为隧道附近有几排建筑，必须确保安全，防止发生过量沉降，对单线隧道按照新奥法原理

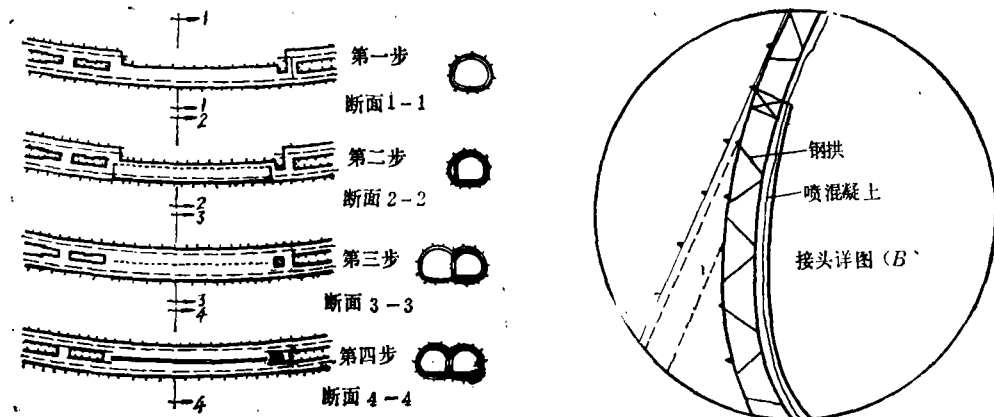
施工，用液压挖掘机平行掘进，没有特别困难，采用双层衬砌，长约500m。

对车站双线断面部分，其施工方法为图十所示，先打通右侧单线隧洞，接着进行内层衬砌，同时修建半个中间支柱，然后打通左线隧洞，如同右侧一样灌注内层衬砌和修建剩下的



图九

半个中间支柱, 值得注意的是在这种情况下, 虽然在隧道中线外部的荷载很大, 中间支柱分两步做成, 还是成功的。



图十 双线断面施工步骤

(2) 第二段

本段隧道通过石炭纪坚岩, 上覆湿砂, 湿砂, 以上为“更新世”(Pleistozöne)地层, 为黄土(Lös)粉土, 中细土等, 中间还有夹杂物地表以下为不同层次的填土, 与第一段不同, 本段有地下水, 围岩层次倾向线路 $60-70^\circ$, 侧压力很大, 对于这样大的水平压力, 选择施工方法的一个突出要求, 就是多分部开挖, 面积小, 同步掘进, 施工步骤如图十一所示。

第一步: 开挖中间隧洞

第二步: 做中间隧洞支护

第三步: 开挖两侧隧洞

第四步: 灌注全断面内层混凝土衬砌

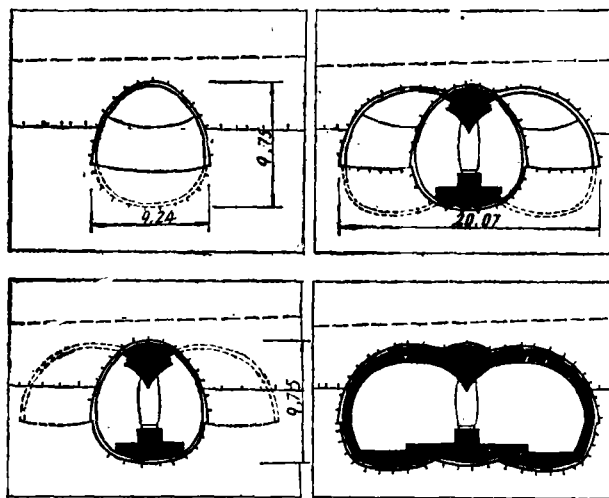


图 十一

首先打通中间隧洞, 面积为 48m^2 , 灌注底梁面和顶梁后, 同步开挖外面的两侧隧洞, 这种施工方法,

可保证由于局部出现侧压, 不致失败。在中间隧洞打通后, 接着分段灌注纵梁, 中间支柱, 和内层混凝土衬砌。

(3) 第三段

本段地质情与第二段基本相同, 所不同者是隧道不从基岩中而是从地表层中通过, 覆盖厚度仅 3.5m , 并含有地下水, 只有排走地下水, 围岩才能稍有临时自稳时间。

本站大厅中间无支柱,地表有高速公路传来的荷载(图十二)地面交通频繁,经反复比较,从经济观点出发,决定采用两侧导洞式的新奥法施工,虽然主体工程造价高于明挖方案,但避免了改变交通线路和管道系统,以整个工程造价而论,两侧导洞法还是经济的。

首先开挖两侧导洞,留核心土体,侧洞位于石炭纪地层之中,其侧面为湿砂,侧洞超前,如用做上部开挖的排水沟。当两侧隧洞建成后,接着从两侧直到中心部分用手工机具开挖上部,覆盖层这样薄,跨度达11.26m,不可能采用全断面开挖上部,只有小心翼翼地分部开挖在施工过程中进行量测控制才能取得成功。

首先开挖上部的左侧,在钢拱架的三分之一点设置焊接夹板,同时下面支承,然后开挖右侧部分,也在钢拱架的三分之一点设置夹板,随即挂网和喷混凝土对开挖面进行封闭,同时对掌子面也要封闭,只有在左右各三分之一部分挖通和支护后,才接着开挖中部剩下的三分之一。

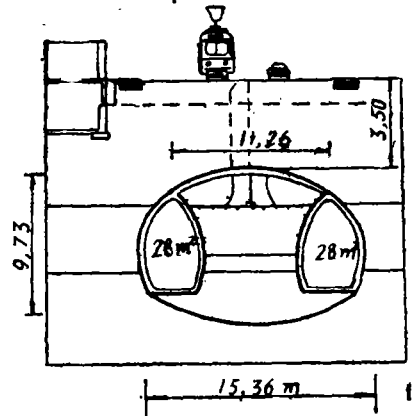
因为有从地表传来的动荷载,在拱顶处和设置液压支柱,进行缓冲,约8小时能完成一个拱圈。

在上部掘进后,接着挖核心土体,进行后部工序:如修建隧道底部和灌注混凝土内层衬砌,从上部开挖算起,总沉陷值为35mm,符合规定的安全度。

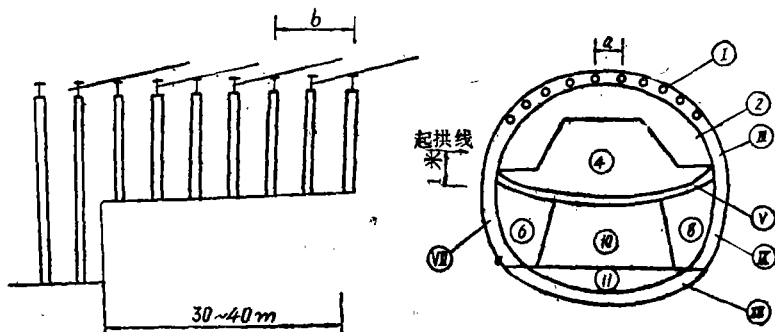
(二) 国内的实践

我国正在施工的双线铁路隧道,有的覆盖层很薄,如京广线南岭隧道中的一段,覆盖层厚度仅7—9m,隧道通过风化砂,页岩互层,大秦线军都山隧道的进口端有505m长的一段,覆盖层厚度12—23m,洞身穿过第四纪黄土夹碎石,含水量较多,处于可塑状态,两者均试用新奥法,分上下两部开挖,喷锚支护,后者用钢拱支撑,前者未用,结果在掘进中坍塌冒顶,相继发生,引起高度重视,经深入探讨,找出不安全因素,对浅埋隧道的施工方法进行改进。

(1) 现军都山隧道浅埋部分的施工方法改进后,如图十三所示,采用上下台阶法施工,台阶长度不超过30—40m。



图十二



图十三 开挖顺序图

1. 超前支护采用管棚, 间距 $a=0.4\text{m}$ (在黄坤) $a=0.2\sim 0.3\text{m}$ (在紧密砂层中, 钢管直径20—40mm长25—30m)

2. 环状开挖

3. 拱部初期支护

4. 挖核心土体

5. 临时仰拱成环

6. 8. 挖马口

7. 9. 边墙临时支护

10. 挖下部核心土体

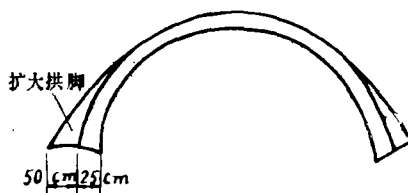
11. 挖底

12. 做外层仰拱

其中最重要的改进是加做临时仰拱成环和扩大拱脚 (图十四) 由原来 25 cm, 另外加大 50cm, 显著地减轻拱脚处的压强。经采用改进开挖方法以后, 由于所有参加人员积极努力, 职责清楚自觉地谨慎工作, 至今未发生事故, 但施工十分困难又不安全。

(2) 香炉坑双线铁路隧道

这是衡广线正在施工中的一条隧道, 全长 238m, 地质条件差, 围岩压力较大进口段长约15m, 覆盖层厚度为3.76m—8 m出口段长47m, 覆盖层厚度为4.73m—15.93m, 隧道中间部分覆盖层最大厚度为28m, (表一)。



图十四 扩大拱脚

表一

里 程 (公里)	轨 面 高 (m)	拱 顶 高 (m)	地 面 高 (m)	覆 盖 厚 度 (m)
2213+137	29.24	37.64	41.40	3.76
+14322	29.21	37.61	43.24	5.63
+150				~8.00
+200	28.90	37.30	64.48	27.18
+23108	28.48	37.24	65.56	28.32
+24891	28.74	37.14	64.21	27.07
+26891	28.63	37.03	62.56	25.53
+32891	28.31	36.71	52.64	15.93
+35891	28.15	36.55	47.04	10.49
+36891	28.10	36.50	44.98	8.48
+375	27.96	36.36	41.09	4.73

参照大秦线西坪隧道通过大坍方的成功经验和军都山隧道通过浅埋地段的施工困难和风

险,以及国外的施工经验,对本隧道决定试用双侧导洞法施工方法,防水混凝土衬砌,不用防水板。其中较新颖的是洞门采用倾斜形式,节省污工。

(3) 北京地铁折返线

折返线全长 338m,其中包括两条单线,一条双线,本段位于街道以下,最小覆盖层厚度约 10m,其中人工填土厚约 4—5 m,粘砂土厚约 3—4 m,再以下为粉细砂,砾石,卵石和砂夹卵石,隧道通过地段为砾石,卵石层。部分地段通过粉细砂层。地下水位在隧底以下。

本段地面来往车辆,特别频繁,日达 5 万辆以上,车辆重 20t 采用暗挖法施工,能保持交通畅通,避免拆迁,又能保持市容整洁,经过经济比较,工程总造价也比较明挖法低,故决定采用暗挖法施工。

对单线隧道决定采用微台阶法,对双线隧道则用双侧导洞法施工。预计单线日掘进 30m,双线日掘进 20m 施工期限定为 365 天。

三、几点体会

1) 明挖法

山岭隧道左右,一般很少建筑物,也没有频繁的交通线路,如隧道的覆盖层最深在 15m 左右,岩层破碎,特别是隧道通过土质地段又有地下水时,首先宜考虑明挖法施工,如前介绍的大秦线军都山隧道进口段,如当初采用明挖,可能没有现在暗挖中的困难和风险,施工进度也可能快的多。对明挖法施工,优选护壁方式是关键问题,究竟采用敞口开挖,沉井法,地下连续墙法,以及喷锚或采用各种类型的桩于护壁,应做技术经济和可靠性比较(图八)。

2) 暗挖法

(1) 如覆盖层很薄,但隧道通过的围岩较好,经过技术经济比较,暗挖法确属优越亦可采用(图九)。

(2) 覆盖层虽薄,围岩也不好,但地面交通频繁采用明挖时拆迁工作量大,经过技术经济和施工方法可靠性的比较,结果如暗挖法的总造价节省,又能保证施工安全,可用暗挖法,(图十二)前面介绍的北京地铁折返线的施工法,就是这样决定的。

(3) 覆盖层很薄,围岩又坏,采用暗挖法主要是多分部,如图十一,十二,十三,即中间导洞法,双侧导洞法和环状开挖法,究竟采用何种施工方法,除做技术经济比较外还要考虑施工方法的可靠性,后者更有突出必要。施工方法的可靠性或安全性特差,不只施工人员战战兢兢人人自危,工效也提不高,且随时有坍塌可能,引起伤亡事故。

从结构观点考虑,双侧导洞法比环状开挖法(或称上下断面法)安全可靠,如采用后者,关键问题是扩大拱脚,以减轻压强单线隧道拱脚的支承宽度宜采用 80cm(详见 1985—11《铁道建筑》),双线隧道拱脚的支承宽度为 160cm 左右(图四)。

此外双线隧道采用环状开挖时,应及时在上部的底部加建仰拱临时成环,同时对上部开挖也要分部进行安装的钢拱,宜分成三段,在拱的三分之一处,设置夹板,在开挖当中的部分时,将三部分钢拱拼接一起比较安全(图十二)。

3) 暗挖明挖并用

浅埋隧道通过碎岩层,覆盖原也有深浅之分,如香炉坑隧道洞口两端覆盖较薄,中间部分

较厚,前者宜采用明挖法施工,后者采用暗挖法(双侧导洞法)施工。

4) 压浆加固地层

对浅埋大断面隧道,通过破碎围岩,不论采用何种暗挖方法,一般都要局部压浆加固地层,以减少变形保证施工安全,如地面变形限制很小时(北京地铁规定15cm)压浆范围还要扩大。

5) 采用防水混凝土衬砌不用防水板

浅埋隧道,地下水压力很小,最宜采用防水混凝土,防水等级B8就够了。

参 考 资 料

- (1) Der Tunnel《Verbindungsbahn der S-Bahn Stuttgart Dokumentation ihcec
Entstehung
- (2) 《Die Bundesbahn》1986-7
- (3) E.T.R. 1981-3
- (4) Hochtief Nachrichten 1986-3
- (5) トリネル地下通巻187号1986-3