

铁路隧道建设理念和设计原则

王梦恕¹, 张梅²

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 中华人民共和国铁道部工程管理中心, 北京 100866)

[摘要] 铁路隧道的建设正处于前所未有的大发展时期, 笔者在总结大量工程成功经验和失败教训的基础上提出了铁路隧道建设的基本理念: 隧道必须建成遗产工程; 隧道必须进行科学的风险评估; 隧道建设必须合理工期、合理造价、合理合同、合理施工方案和设计原则; 隧道必须进行信息化施工。提出了单双线隧道选择、隧道纵坡及辅助导洞设置、支护结构设计以及快速施工等隧道设计原则。隧道建设的理念和设计原则可指导今后铁路隧道的规划、设计和施工。

[关键词] 铁路隧道; 建设理念; 设计原则

[中图分类号] U455 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)12-0004-05

1 前言

交通发展, 铁路先行。随着对环境、能源问题的深入认识, 我国的铁路建设进入了新的大发展时期, 而隧道工程在我国铁路建设中占有重要地位。据不完全统计, 截至 2005 年末, 我国共建成铁路隧道 6 874 座, 总延长 4 158 km, 连同建国前修建的 664 座、总延长 156 km 的铁路隧道, 已建成的铁路隧道已有 7 538 座、总延长 4 314 km^[1]。在新一轮的铁路建设中, 在建和规划建设的铁路线有宜万线、兰渝线、贵广线、大瑞线、成兰线等, 这些线路地质条件复杂, 隧道所占的比重大, 隧道修建的难度也很大。据不完全统计, 目前我国铁路隧道正以每天增加 3 km 的速度向前推进, 建设速度之快可想而知。在这种情况下, 如何保证铁路隧道建设的安全和之后的运营安全, 需要在深刻总结以往建设经验和教训的基础上, 进一步明确建设理念和设计原则。

2 铁路隧道建设理念

1) 隧道与地下工程是不可逆工程, 不具备拆除重建的条件, 因此必须是遗产工程。不允许是遗憾工程和灾害工程。

2) 隧道与地下工程是风险性很大的工程, 必须实事求是, 科学地进行风险性评估。

评估主要内容为: 施工安全评估、施工质量评估、环境评估, 最后是施工进度和施工成本评估。在建设全过程中应对可研阶段、初步设计阶段、施工阶段、运营阶段进行全方位工程风险分析。

据国际隧道工程保险集团对施工现场发生安全事故原因的调查结果表明, 将施工方作为工程安全唯一主体是不科学的, 目前五个阶段的风险界定不清, 而这些风险往往到施工时才反映出来, 由施工方完全承担这些风险是不合理的。

3) 合理工期、合理造价、合理合同、合理施工方案是隧道建设检验科学发展观的 4 条标准。如青藏铁路复线西格段的关角隧道 (32 km) 设计, 应考虑小 TBM + 钻爆法施工新模式。利用二线导洞快速施工 + 横通道模式, 取消斜井, 取消工费高、造价高的向上运输方式。

4) 必须进行信息化动态反馈设计。通过支护参数调整, 确保施工安全, 不改变设计是不科学的, “精心设计, 精心施工, 在建设过程中会有错误和失败, 必须及时修正。”

[收稿日期] 2009-10-22

[作者简介] 王梦恕 (1938 -), 男, 河南温县人, 中国工程院院士, 北京交通大学教授, 博士生导师, 研究方向为隧道及地下工程设计与施工新技术; E-mail: wms3273@263.net

3 铁路隧道主要设计原则

3.1 单洞双线隧道和两个单线隧道的选择原则

1) 钻爆法施工时,有轨运输独头通风最大长度 7~8 km;无轨运输独头通风最大长度 3.5 km。

2) 施工通风有两种方式,洞口压入式管道通风(传统方式)适用条件可单洞压入,但耗电、通风长度短;洞内射流巷道式通风,但必须有平行两个洞,可省电、效率高,可实现独头 10 km 以上通风,这是隧道施工通风的新成果。

3) 从设备投入和快速施工考虑,有轨运输设备投入大,管理复杂,充电电池满足不了长距离运输;无轨运输设备投入小,配合洞内射流巷道通风,是快速施工的最好模式。

鉴于以上 3 点,建议优先选用两个单线隧道设计方案。不要任何斜竖井可实现特长、长隧道的安全、快速施工,也不破坏山体环境。该方案对建设过程和建成后都会带来很大方便,尤其在软弱、岩溶、煤系、浅埋、大变形地层更会减少风险和工程投资。

若一定要用单洞双线隧道,不设平导,采用无轨运输,设计长度应小于 7 km;不设平导,有轨运输,设计极限长度应小于 15 km,设备投入比无轨多 2.5 亿元以上,综合全面比较,该方案风险大,且投入大。折中方案是单洞双线隧道加平导全贯通,但该方案更不经济。

3.2 隧道纵坡设置原则

1) 应高位选线(如南昆线),可避免许多灾害。

2) 禁止在岩层交界面上选线,如深圳福田车站上软下硬,很难施工。

3) 富水地区必须采用人字坡,以利于防灾和排水。关于富水的定义:水量 > 2 台最大抽水机的排水量。

4) 铁路进城市应按深埋选线,减少对环境的破坏。石家庄市客运专线的选择是一成功范例。

3.3 隧道辅助导洞设置原则

1) 利用平导增设工作面、解决施工通风是最好的方法。不设斜竖井施工,可增设多条平导和横洞。如终南山隧道、瑞士阿尔卑斯山隧道等。

2) 深层岩溶及富水地区,必须根据环境评价增设泄水洞和大流水溶洞相连,释能减压,以利于营运安全。

3) 利用射流巷道式通风方式,可改变辅助坑道的理念,可改变长大隧道设计的方法。

采用平行双洞射流通风模型,可解决长大隧道施工通风难题。采用无轨运输模式,施工通风可达 10 km 以上。

4) 施工分段应考虑施工通风的方式,从隧道中部分段优点很多,不允许像 TBM 施工中的单条分割法。

3.4 支护结构设计原则

1) 初期支护是保证施工安全的关键,要有足够的刚度和强度,承受二衬砌施作前施工期间的全部土压力荷载,不计水压力。

2) 软弱、破碎围岩(V, VI级)按普氏拱理论计算压力; I, II, III, IV 级围岩按爆破松动圈 2~2.5 m 厚计算压力。

3) 初期支护由喷网、网构钢拱架、锁脚锚管、纵向链接筋组成,形成永久承载结构,二次混凝土衬砌作为安全储备。

4) 不同围岩的稳定由初期支护进行调整,可加强或减弱,当在 5~6 倍洞径处通过量测证明已稳定的情况下,方可进行二次衬砌拱墙的混凝土灌注。二次衬砌分三次施工:一是底层混凝土和仰拱可以跟在工作面 1 倍洞径以外,二是衬砌边墙基础紧跟,目的是增加一次支护的安全系数。三是拱墙模板台车衬砌。

5) 二次衬砌作为安全储备,从有利百年大计出发可不设钢筋(当断面轮廓为小偏心受压时,衬砌厚度一般定为 30~40 cm,不随围岩改变而改变)。

6) 必须取消拱部锚杆;必须采用网构钢拱架;软弱地层不提倡湿喷混凝土;必须取消中部排水沟;有钢拱架的地方可不设系统锚杆,而在接头处设置锁脚锚管。

7) 暗挖隧道不设变形缝;防水隔离层背后设系统盲管,防水隔离层不允许全包,只包到边墙底基础上,和两侧排水沟形成排水系统;取消止水板,施工缝处设置 BW 防水条。

8) 在二衬及防水板铺设前应进行初期支护,背后充填灌浆,确保二衬在无水下施工。

9) 高地应力、大变形地段采用圆形轮廓断面衬砌是最简单有效的方法。

3.5 快速施工原则

1) 隧道的出路在于机械化。

2) 应配置钻孔作业线、装碴运输作业线、一次衬砌作业线、防水及二次衬砌作业线 4 条主线。应配置施工通风作业线、注浆防排水作业线,两条辅助

线。

3) 采用光面爆破工艺、导洞超前、全断面扩大,可实现减震、光爆、快速施工。全断面开挖改为小TBM超前打通,后部用钻爆法扩大的优点是:a.可以进行超前地质预报;b.爆破振动减小30%,炸药比全断面爆破减少5%~10%;c.扩大爆破孔的炮眼利用率为100%,所以提高开挖速度2~3倍;d.炮眼半孔保存率80%,线形超挖小于10cm;e.爆破碴堆、碴块均匀、集中,便于快速出碴;f.纵向爆破冲击波小,对后部工序影响小。

4) 按无轨运输、双洞、射流巷道式通风实现特长隧道无斜竖井设计和施工。

4 其他有关问题

4.1 洞门及洞口段设计理念

1) 洞口位置不当,易产生塌方、偏压,应特别重视洞口位置选择。

2) 洞口间距过大,不利管理和节约土地,可以设置小间距。

3) 洞口不设深路堑(应小于10m)。

4) 优选切削式洞门。

5) 应美化洞口及周边环境。

6) 上下行洞口错开,设挡墙防止废气进入另一洞口、气流短路。

7) 洞口段、洞门、明洞之间应比选合理施工方法。

8) 洞口变坡点要合理设置。

4.2 岩溶区超前地质预报

必须重视岩溶地区的综合地质超前预报。长短结合以短为主,并列人工序,预报范围前方大于30m、隧道周边以外1倍洞径。

4.3 喷混凝土

软弱地层必须采用潮喷混凝土,不提倡湿喷混凝土。

4.4 台阶长度

正台阶法隧道施工不允许分长、中、微台阶,台阶长度为一倍洞径,第一个上台阶高度必须为2.5m,小导管长度为台阶高度加1m。

4.5 辅助施工工法

常用的辅助施工措施有:环形开挖留核心土、喷射混凝土封闭开挖工作面、超前锚杆及超前小导管支护、超前小导管周边注浆支护、设置上台阶临时仰拱、跟踪注浆加固地层、水平旋喷超前支护、洞内真

空泵降水、洞内超前降排水、洞外深井泵降水、地面高压旋喷加固、先注浆后冻结法。要注意全断面帷幕注浆应改为上半断面周边注浆,下半断面降水、排水。采用上堵下排的原理。

4.6 大跨隧道施工

大跨隧道施工应选择变大跨为小跨的施工方法,如CD法、双CD法、CRD法、双侧壁法、柱洞法、中洞法、侧洞法等。临时侧壁应拉直,以减少中间跨度。

4.7 管棚的应用

隧道内一般不设长管棚,只在洞口设置。长管棚的直径应和地层刚度相匹配,当直径超过150mm时,直径的增加对控制地表下沉作用很小。

4.8 联拱隧道

隧道宜近不宜联,可采用小间距隧道,反对双联拱、多联拱,取消盾构隧道的横通道。

4.9 导洞超前

大断面硬岩隧道宜采用小导洞超前爆破,可减震30%,也可采用小TBM超前钻爆法扩大。注意隧道及路堑边坡应采用光面爆破,不能预裂爆破。

4.10 隧道顶部空洞

隧道顶部允许塌方空洞存在,拱顶上方要有2m厚土层保护,对于上部空洞中的水应设法排出,隧道支护应加强,并应配合超前支护。

4.11 盾构和掘进机的选择及施工

4.11.1 盾构施工的经济效益问题

1) 一台 $\phi 6.23$ m的盾构需6000万元,3.5~4年可把6000万收回(不计利息),第五年可开始盈利,每年最多能盈利1000万元。

2) 一般情况,盾构在城市之间搬运,每次需300万~400万元。

3) 盾构从竖井拆除再组装,每次需30万~50万元。

4) 适用盾构法施工的隧道应该是一个盾构掘进长度为6km以上,这是发挥盾构快速施工,性价比最好的工程筹划。

5) 一般配2~3台盾构才能提高稳定技术人员、高级技工的施工能力,这是施工单位合理部署的举措。

因此,应合理、慎重规划和应用盾构。盾构法与钻爆法、浅埋暗挖法相比,经济效益要低10倍左右。

4.11.2 TBM硬岩掘进机

1) 机型方案选择方面。开敞式TBM优于双护

盾式和单护盾式,其优点:a.长度与直径之比 <1 ,可灵活调方向,可确保 ± 30 mm的调整误差;b.能及时支护,有利于洞室稳定,护盾式不利于及时支护,易塌方;c.不易被高地应力地层卡死护盾;d.造价比双护盾便宜 $10\% \sim 30\%$;e.衬砌支护比管片便宜2倍以上。

2) 支护结构方面。a.开敞式TBM用复合式衬砌,最易适应不同地层和富水地层,支护寿命长,可确保100年,维护方便;b.双护盾式TBM必须采用软弱地层管片的厚度,不适应土压、水压多变的山岭隧道,管片厚度不能调整,管片寿命不可靠,且造价高于复合初砌数倍以上,因此不宜采用。

4.11.3 盾构和TBM的生产

必须重视盾构和TBM的国产化。建议对国外采购要设立强有力的评价体系、规定和制度;要建立项目业主、装备制造企业和保险公司风险同担,利益共享的重大技术装备保险机制;国产化率中的关键部件必须进口,国产率在 $50\% \sim 60\%$ 为宜。

4.11.4 盾构类型选择

不同地层应选择不同类型的盾构,应遵循以下原则。

1) 少水地层、砂卵石地层宜选择开敞式网格盾构。少水或无水地层,地层具有较好的自稳性,降水下沉量小(如沈阳、成都等地层),土体颗粒对刀盘

刀具磨损也很大,选择开敞式盾构、网格盾构比较适宜。

2) 土压平衡盾构不是全能的,应同时考虑选用泥水盾构与土压盾构。a.不稳定的粉细砂地层是最适合使用土压平衡盾构,在含水的黄土地层,搅拌后形成塑性好的泥浆会将刀盘全部糊死,该地层不适合土压平衡盾构,应采用降水配合开敞式网格盾构;b.泥水加压盾构的考虑:对于不稳定的软弱地层或地下水位高、含水砂层、黏土层、冲积层以及洪积层等流动性高的地层,使用泥水加压盾构的效果较好。

泥水加压平衡盾构具有土层适应性强、对周围土体影响小、施工机械化程度高等优点;在砂层中进行大断面、长距离推进时,大多采用泥水加压式盾构机。实践证明,掘进断面越大,用泥水加压式盾构机的效果越好;泥水加压式盾构机除在控制开挖面稳定以减少地面沉降方面较为有利外,还在减少刀头磨损、适应长距离推进方面显示出优越性;泥水加压盾构存在盾尾的漏水以及难以确认开挖面状态等缺点,另外还需要较大的泥水处理场地。

4.11.5 刀盘类型的选择

不同地层应选择不同的刀盘类型。目前有两种刀盘形式,开口面板式刀盘和辐条式刀盘。刀盘特性的比较见表1。

表1 两种类型刀盘特性比较

Table 1 Compare of characters of the two types of cutter head

刀盘形式	面板式	辐条式
开挖面水土压控制	一般存在3个压力: p_1 :开挖面—面板之间; p_2 :面板开口进出口之间; p_3 :面板与密封舱内壁之间(即土压计压力)。其中: p_2 受面板开口影响不易确定,而 $p_3 = p_1 - p_2$ 开挖面压力不易控制,同时控制压力实际低于开挖面压力	只有一个压力 p ,密封舱内土压力与开挖面的压力相等,因而平衡压力易于控制
砂、土适应性 (粒径 <15 cm)	由于开挖面土体受面板开口影响,进入密封舱内不顺畅,易黏结,易堵塞	仅有几根辐条,同时辐条后均设有搅拌叶片,土、砂流动顺畅,不易堵塞
砂卵石适应性 (粒径 >15 cm)	适应性强,必要时可加滚刀	不能加滚刀,刀头形式及数量较少
刀盘扭矩	刀盘扭矩阻力大,需增加设备能力,造价高	刀盘扭矩阻力小,设备造价低
隧道内刀头更换安全性	由于有面板,在隧道内更换刀头时安全可靠	在隧道内更换刀头时安全性差,加固土体费用高

4.11.6 盾构和TBM支护形式

常用的支护形式有如下几种,可根据具体情况采用。

1) 管片衬砌。管片衬砌广泛应用于软土地层

盾构隧道的支护,管片接头部位是防水薄弱环节,应研究接头型式及防水材料,管片形状及分块形式,管片厚度及钢筋配置与地层压力的关系。

2) 喷混凝土衬砌。应用于开敞式TBM隧道,

能及时支护,很好地适应软弱破碎围岩,在秦岭隧道及磨沟岭隧道中得到了成功应用。

3) 压缩混凝土衬砌。压缩混凝土衬砌(extruded concrete lining, ECL),就是以现浇混凝土作衬砌来代替传统的管片衬砌。ECL工法具有以下特点:a. ECL工法筑造的衬砌质量高;b. ECL极大地抑制了地层沉降,无须降低地下水;c. 采用全机械化施工,节省人员、安全性高,作业环境好;d. ECL工法采用一次衬砌,材料用量少,不需要同步注浆;e. 施工阶段工序少,衬砌与拼装同步进行,加快了施工进度,缩短了工期。

4) 复合衬砌结构。薄管片和二次模筑组成复合式衬砌,该型式耐久性好,强度高,适于铁路隧道或重要通道。

4.11.7 水下隧道的施工方法选择

江河隧道施工方法应优选钻爆法和浅埋暗挖

法,其次选择盾构法、掘进机法,在松软地层可采用沉管法。严禁在岩石为主的地层中采用沉管法,水下爆破不可行。

5 结语

铁路正以全新的面貌繁荣着我国的交通事业,铁路隧道的建设面临着许多机遇和挑战。笔者在以往隧道建设经验和教训的基础上归纳总结了铁路隧道的建设理念和设计原则,旨在更好地为铁路隧道的建设发展服务。

参考文献

- [1] 王效良,赵勇.从数字看中国铁路隧道的建设[J].现代隧道技术,2006,43(5):7-17

Construction idea and design principle of railway tunnels

Wang Mengshu¹, Zhang Mei²

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Ministry of Railways P. R. C, Beijing 100866, China)

[Abstracts] Railway tunnel construction is on the unprecedented development. On the basis of analyzing lots of successful and failing engineering projects, the basic idea for railway tunnel construction was put forward, i. e., railway tunnels must be durable; its risk evaluation should be estimated scientifically; the construction time, cost, contract, scheme and design principle should be reasonable; and railway tunnels must be constructed under information management. The design principles were put forward, such as, the selection of single-line or double-track tunnel, the setting of longitudinal slope and aided pilot tunnel, the design of supporting structure, and fast construction, etc. The construction idea and design principle of railway tunnels would provide guideline for tunnel design and construction.

[Key words] railway tunnels; construction idea; design principle