

长江第一隧——武汉长江隧道修建技术

王梦恕, 孙 谋, 谭忠盛

(北京交通大学, 北京 100044)

[摘要] 武汉长江隧道是长江上第一条江底隧道。隧道穿越的地质条件复杂, 地层透水性强, 水压高; 盾构直径大, 一次推进距离长; 地面和地中环境复杂。介绍了武汉长江隧道工程研究与设计经过, 工程建设模式, 隧道的总体设计、施工概况。着重阐述了盾构的选型和沿线建筑物的保护技术。

[关键词] 武汉长江隧道; 建设模式; 总体设计; 施工

[中图分类号] U238 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)07-0011-07

1 工程概况

万里长江第一隧——武汉长江隧道位于武汉长江大桥、二桥之间, 北接汉口大智路, 南通武昌友谊大道, 隧道全长约 3.7 km, 双向 4 车道, 车道净高 4.5 m, 设计车速 50 km/h。预测 2010 年隧道总流量 6.4×10^4 辆/日, 2020 年预计可达到 7.8×10^4 辆/日。隧道于 2004 年 11 月 28 日正式开工建设, 2008 年 1 月 19 日东线隧道顺利贯通, 4 月 19 日西线隧道顺利贯通, 2008 年 12 月 28 日武汉长江隧道通车试运行。

武汉长江隧道是目前国内技术复杂的隧道工程之一, 隧道穿越的地质条件复杂, 地层透水性强, 水压高; 盾构直径大, 一次推进距离长; 地面和地中环境复杂, 需穿越武九铁路、长江防洪堤和多幢建筑, 并且穿越多条城市干线, 地中管线较多。武汉长江隧道在预定工期内安全优质建成, 是与其周密设计、精心施工和创新的模式分不开的, 其成功经验可为其他类似工程提供借鉴。

1.1 工程研究与设计经过

从 20 世纪 90 年代开始, 武汉市就开始酝酿修建过江隧道。1999 年, 武汉市计委委托铁道第四勘察设计院(以下简称铁四院)编制了武汉长江隧道工程预可行性研究性研究报告。2001 年 4 月, 中国国际工程咨询公司专家组对预可行性研究性研究报告进行

了评估。2002 年 4 月, 国家计委正式批准武汉长江隧道(含地铁)项目立项, 2003 年 8 ~ 12 月, 武汉市城市建设投资开发集团有限公司委托铁四院等单位开展了可行性研究报告的编制工作。2004 年 4 月, 中国国际工程咨询公司专家组对报告进行了评审。2004 年 5 ~ 8 月, 武汉市城市建设投资开发集团有限公司组织了本工程的设计采购施工总承包投标工作, 由中隧集团联合体中总承包标, 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院中设计监理标。2004 年 10 月, 国家发改委批准了武汉长江隧道工程可行性研究。2004 年 9 ~ 10 月, 铁四院完成了本工程的初步设计, 11 月初长委设计院提交了初步设计监理报告, 铁四院进行了修改完善。2004 年 11 月 28 日, 长江隧道正式开工建设, 计划工期 4 年。

1.2 工程建设模式

工程在武汉市首次采用“设计—采购—施工”总承包模式, 中铁隧道集团有限公司联合体成为中标者, 联合体由铁四院、中铁隧道集团、武汉市城市规划设计院、武汉市政建设集团有限公司和奥地利 D2 咨询有限公司组成。实行工程总承包是国际经济一体化和市场经济发展的必然趋势, 它的最大特点是实行设计、施工管理一体化, 把资源最佳地组合到建设工程项目上来, 减少管理链与管理环节, 集中优秀的专业管理人员, 采用先进的管理科学方法, 真正体现风

[收稿日期] 2009-02-05; 修回日期 2009-04-15

[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、施工技术; E-mail: wms3273@263.net

险与效益、责任与权力、过程与结果的统一。

2 隧道工程地质

2.1 工程地质与水文地质

长江隧道江中段水下地层上部由第四系全新统新近沉积松散粉细砂,中粗砂组成。中部由第四系全新统中密~密实粉细砂组成,下部基岩为志留系泥质粉砂岩夹砂岩、页岩;江南及江北两岸地层除地表有呈松散状态的人工填土和局部分布有第四系湖积层外,上部由第四系全新统冲积软~可塑粉质粘土,中部由第四系全新统稍密~密实粉细砂组成,下部基岩为志留系泥质粉砂岩夹砂岩、页岩。

长江水系为区内主要地表水系,直接影响长江隧道建设。据长江水样水质分析:长江水对混凝土及混凝土结构中的钢筋无腐蚀性,对钢结构有弱腐蚀性。主要地下水类型有第四系孔隙潜水、承压水、基岩裂隙水。

设计根据河工模型试验对河床最低冲刷标高的预测成果,并充分考虑三峡建库后的水沙条件,按300年一遇最低冲刷标高设计,左右深槽的最低冲刷标高分别为-13.8 m和-11.3 m。

2.2 地震烈度

不同概率水平下的烈度见表1。

表1 不同概率水平下的烈度

Table 1 Earthquake intensity under various probability standards

概率水平	50年				100年			
	63.2%	10%	5%	2%	63.2%	10%	5%	2%
江南段	4.7	6.1	6.5	6.9	5.2	6.5	6.8	7.1
长江段	4.7	6.1	6.5	6.9	5.2	6.5	6.8	7.1
江北段	4.7	6.1	6.5	6.9	5.2	6.5	6.8	7.1

设计按100年基准期超越概率10%的地震动参数设防,按超越概率2%的地震动参数验算。

3 武汉长江隧道总体设计

武汉长江隧道是一项规模宏大的工程,周密的设计是成功建设的前提。武汉长江隧道的设计包括线路、结构、防水、通风、供电、给排水、防灾、防洪、环保等许多内容。

3.1 线路平面设计

在对工程沿线地面建筑、地下管线和地下构筑物进行详细了解的基础上,充分结合规划意图,进行方案比选。隧道平面设计如图1所示。线路先后下

穿中山大道、胜利街、鲁兹故居、汉口江滩公园入口、临江大道、和平大道、友谊大道,隧道左线长3 630 m,右线长3 638.53 m,平曲线最小半径250 m。左线曲线长1 366.149 m,占路线全长的37.6%;右线曲线长1 213.225 m,占路线全长的33.4%。隧道建设规模为:汉口引道敞口段长145 m、暗挖隧道段长40 m、明挖暗埋隧道段长455 m,盾构段长2 550 m,武昌明挖暗埋隧道段长250 m、引道敞口段长160 m,6条匝道总长2 065 m^[1]。

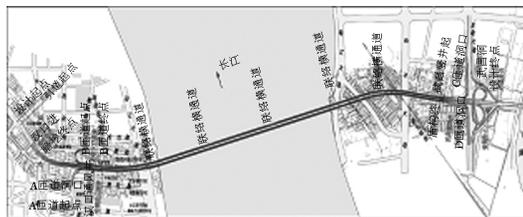


图1 武汉长江隧道线路平面图

Fig. 1 Route plan sketch of Wuhan Changjiang tunnel

3.2 隧道纵断面设计

纵断面的设计重点是确定合理的隧道埋置深度,根据长江隧道的地质和水文情况,隧道纵断面设计时拟定了3个方案,盾构不穿基岩方案、切入基岩深度约0.8 m方案和切入基岩深度约3.5 m方案,比选时从施工难度、施工风险、冲刷影响及施工对河床的影响等综合进行考虑,选择了隧道埋置深度较大、切入基岩较多的方案,尽管在基岩中施工难度较大,但其施工风险最小,适应河床冲刷能力最强,施工对河床完全无影响。隧道纵断面设计见图2。

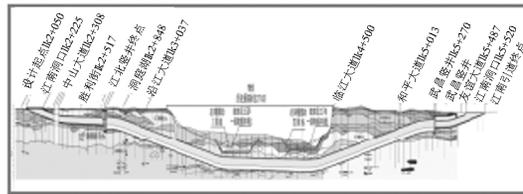


图2 隧道纵断面设计图

Fig. 2 Design scheme of tunnel longitudinal profile

3.3 隧道总体布置

隧道设有武昌工作井和汉口工作井,分别为盾构始发井和到达井。在汉口工作井西侧,设有汉口通风井,其作用是排除左线隧道洞内污染气体,以及

当火灾发生在靠近该通风井的隧道段内(左线或右线)时的排烟。武昌通风井布置于隧道与友谊大道交叉口的西北角,其作用是排除右线隧道洞内污染气体,以及当火灾发生在靠近该通风井的隧道段内(左线或右线)时的排烟。结合通风井的布置,设置了地面进出隧道的安全通道。隧道设有管理大楼,总建筑面积 3 984.46 m²,武昌通风井和汉口通风井均设变配电所。

3.4 隧道横断面设计

由于采用盾构法进行施工,为满足使用功能及施工误差、预留沉降、内装修要求,半径方向预留 15 cm 富余空间后,圆形隧道内径确定为 10.0 m。由于本隧道交通量大,高峰时段不明显。一旦发生火灾,必须采用射流风机,将人烟分离,隧道顶部不允许设置横隔板,以防造成烧落伤人。半横向通风效果很差,反而助燃加剧,运营期间会损失 10 % 的通风能量。为满足人员逃生要求,盾构段于行车道一侧间隔 80 m 设置滑行逃生道,盾构段横断面设计如图 3 所示。盾构段采用单层衬砌,混凝土强度等级 C60,抗渗等级 S18。

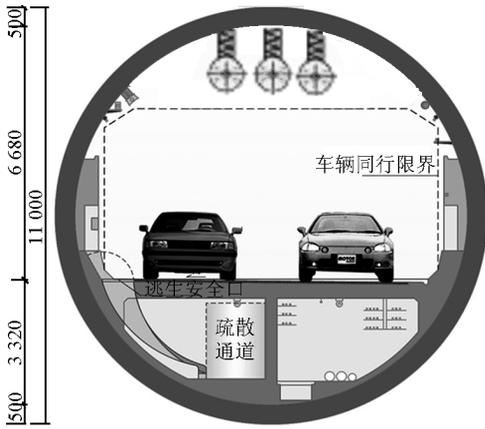


图 3 隧道横断面设计图(单位:mm)
Fig. 3 Design scheme of tunnel cross section (Unit:mm)

长江隧道的明挖和暗挖段均采用矩形框架结构。图 4 为武昌明挖暗埋风机安装段横断面布置图。

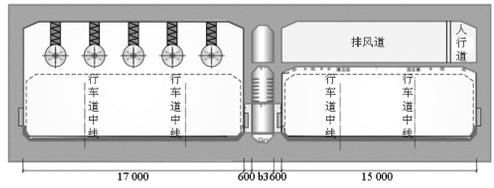


图 4 武昌明挖暗埋风机安装段横断面(单位:mm)

Fig. 4 Cross section of Wuchang cut-and-cover fan installation sector (Unit:mm)

3.5 隧道通风系统布置

长江隧道设计采用的通风卫生标准见表 2。

表 2 设计采用的通风卫生标准

Table 2 The design venting standard

交通工况	车速/(km·h ⁻¹)	CO 浓度/ppm	烟雾浓度/m ⁻¹
正常	50	100	0.007 5
慢速	30	125	0.007 5
全段阻塞	20	150(15 min)	0.009 0
局部阻塞	10(局部)	150(15 min)	0.009 0
双向阻塞	30	150	0.007 5

根据工程特点,非火灾情况下,隧道通风采用竖井吸出式纵向通风方式,其中左线隧道利用汉口通风井排风,右线隧道利用武昌通风井排风。火灾情况下,仍采用正向或逆向通风,进行人烟分离。计算确定当汉口、武昌通风井排气高度为 40 m 时,可以满足环保要求。通风方式如图 5 所示。

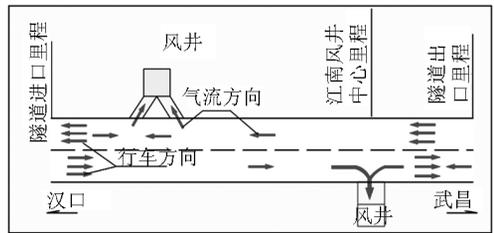


图 5 通风方式选择及污染空气排放方式

Fig. 5 Mode of venting and pollution air discharge

3.6 隧道防灾设计

作为长江上的第一隧道,武汉长江隧道在设计时充分考虑了其防灾功能。防灾、减灾和救灾功能

的实现贯穿在设计的每一环节。在隧道的结构设计、建筑设计、给排水系统设计、消防设计、通风设计、供电照明设计、监控系统设计、人防设计、防淹设计中,无一不包涵着防灾的设计理念。如在隧道的横断面设计中,在每条盾构隧道段的车道板下设置了 $1.5\text{ m}\times 2.1\text{ m}$ 的紧急逃生通道,在车行道路缘带及余宽内每隔 80 m 设一个逃生口和逃生滑梯,直达逃生通道。车道两侧设置防撞侧石,以保护隧道侧墙装修和隧道结构不受破坏。隧道内还设置了醒目的安全疏散标志和安全口指示标志。为防止火灾对隧道结构的破坏作用,在隧道内已增设二次混凝土衬砌,以保护和增强管片衬砌,确保结构的稳定性。另外,在隧道两侧 2.5 m 高范围内设置防火板,其余衬砌表面涂防火涂料。隧道中设置了简化而可靠的火灾报警系统、应急照明系统和消防系统。

4 武汉长江隧道施工

武汉长江隧道工程地质条件复杂,地层软硬不均、高压富水、地面建筑物和地中管线众多,面临着五大技术难题。a. 姿态控制难,盾构机穿越软硬不均的地质,掘进姿态难以控制,搞不好就走偏了,难以到达指定的位置。b. 高水压,隧道从水面到底部深 57 m ,江水的压力极大,防止隧道透水是最大难点。c. 超浅埋,部分地段盾构机离地面只有 $5\sim 6\text{ m}$,要不“惊动”地面建筑难度极大。d. 强透水,隧道两岸大部分为粉细砂地层,一旦透水,后果不堪设想。e. 长距离掘进,由于江底换刀困难,盾构机要尽可能一次穿越 $2\,500$ 多米。为了确保隧道施工的安全和按期高质量完成工程,中隧集团联合体在大断面盾构机选型和关键技术参数确定、大直径泥水盾构开挖面稳定技术、长距离掘进耐磨刀具研究、高抗渗大直径管片生产与拼装及沿线建构筑物的保护等方面进行技术攻关,在每一环节做到精心施工。

4.1 大断面盾构机选型

4.1.1 盾构机选型依据及原则

盾构机的性能及其与地质条件、工程条件的适应性是盾构隧道施工成败的关键,所以采用盾构法施工就必须选择最佳的盾构施工方法和选择最适宜的盾构机。

盾构选型主要依据武汉长江隧道工程招标文件和岩土工程勘察报告;相关的盾构技术规范及参考国内外已有盾构工程实例,盾构选型及设计按照可靠性第一,技术先进性第二,经济性第三的原则进

行,保证盾构施工的安全性、可靠性、适用性、先进性、经济性相统一。

4.1.2 影响盾构机选型的主要因素

选择盾构形式时,应考虑施工区段的地层条件、地面情况、隧道尺寸、隧道长度、隧道线路、工期等各种条件,还应考虑开挖和衬砌等施工问题,基本原则是选择安全而且经济的进行施工的盾构。近年来竖井、碴土处理或施工经验也会成为盾构选型的重要因素。

在选择盾构形式时,最重要的是以保持开挖面稳定为基点进行选择。为了选择合适的盾构形式,应对地质条件、地下情况、周边用地环境、周围环境进行详细的调查,并对安全性及经济性做充分的考虑。盾构选型的流程如图6所示。

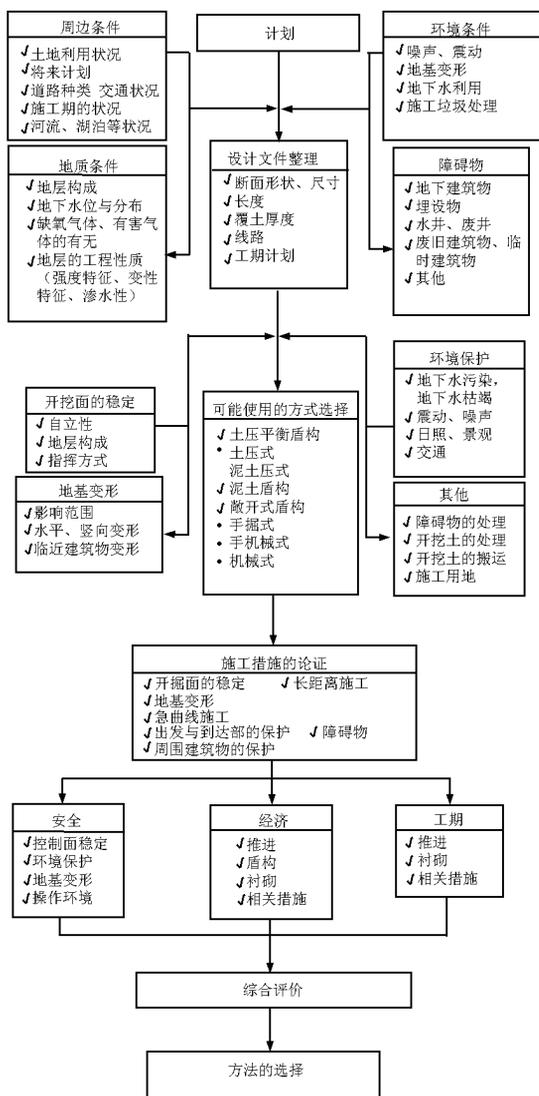


图6 盾构选型流程图

Fig. 6 Flow process chart during selecting shield type

4.1.3 盾构机类型的确定

不同类型的盾构适用的地质类型也是不同的,盾构的选型必须做到针对不同的工程特点及地质特点进行针对性方案设计,才能使盾构更好地适应工程。盾构的主要类型有敞开盾构、泥水盾构、土压平衡盾构等。根据武汉长江隧道工程地质、水文情况及工程特点,初步确定可选择的盾构类型只有土压平衡盾构和泥水盾构。

土压平衡盾构和泥水盾构所适应的地层条件不同,土压平衡盾构可分为两种:土压式和泥土压式。土压式适用于含水量和颗粒组成比较适中,开挖面的土砂可以直接流入压力舱及螺旋输送机,从而保持开挖面的稳定。土压平衡式盾构由于是根据土压力的状况同时进行挖土和推进,通过检查土压力不但可以控制开挖面的稳定性还可以减少对周围地层的影响。一般不需要实施辅助工法,所以具有减小地表沉降的优点。泥土压式适用于砂粒含量较多而不具有流动性的土质,需要通过添加水、泥水或其他添加材料使泥土压力很好地传递到开挖面。泥土压式盾构可以适用于冲积砂砾、砂、粉土、粘土等固结度比较低的软弱地层,洪积地层以及软硬相间互层等地层,对地层的适应性最为广泛。但在高水压的地层中,仅用螺旋输送机难以保持开挖面的稳定,需要安装保持压力的过滤器、连接压送泵等。

泥水盾构是通过施加略高于开挖面水土压力的泥浆压力来维持开挖面的稳定。除泥浆压力外,合理地选择泥浆的特性可以增加开挖面的稳定性。一般比较适用于在河底、海底等高水压条件下隧道的施工,具有较高的安全性和良好的施工环境。对周围地层的影响较小,既不会对地层产生过大的压力也不会受到地层的压力的反压,一般不需要辅助施工措施。

泥水盾构适应于冲积形成的砂砾、砂、粉砂、粘土层、弱固结的互层的地层以及含水率高不稳定的地层,洪积形成的砂砾、砂、粉砂、粘土层以及含水很高的高固结松散易于发生涌水破坏的地层,是一种适合多种地层条件的盾构形式。但是对于难以维持开挖面稳定的高透水地层、砾石地层,有时也需考虑辅助施工方法。

武汉长江隧道盾构穿越的地层有粘土、粉土、粉质粘土、淤泥质粉质粘土、粉细砂、中粗砂、卵石层、泥质粉砂岩、夹砂岩、页岩,其中以粉细砂、中粗砂、

卵石层、泥质粉砂岩夹砂岩页岩为主,根据土压平衡盾构和泥水平衡式盾构对地层的适应性,该工程适合采用泥水盾构。

工程实践证明,在开挖面刀盘后部泥渣仓中土压和水压很难及时稳定工作面,而主要靠刀盘压住工作面,造成刀盘、刀具磨损严重,尤其在盾构刀盘后的顶部约有 $1/3 \sim 1/5$ 高度没有泥水或泥土,在不稳定地层易产生工作面局部失稳,造成沉降加大,为此增设局部气压,以弥补泥仓顶部的压力不足,这是非常重要的,从浆液劈裂工作面顶部滴浆的过程中,更感到气垫的重要,因此,改用气垫式泥水盾构是水下盾构法施工所必须的。

4.2 沿线建(构)筑物保护技术

尽管采用盾构法具有对周围环境影响小的特点,但由于施工技术质量、周围环境和岩土介质等的复杂性,盾构法施工引起地层移动而导致不同程度的沉降和位移仍是不可能完全避免的。当地层移动和地表变形超过一定限度时,就会影响地面建(构)筑物和地下管线的正常使用。武汉长江隧道沿线穿越长江防洪堤、武九铁路、鲁兹故居等大量建筑群,由于隧道上方多为繁华路段,地下管线密集。施工中需采取有效的保护措施保证建(构)筑物的安全。

4.2.1 对长江防洪堤的保护

隧道于LK3+143处下穿江北防洪堤,基底至隧道顶的距离约25.3m。隧道于LK4+462处下穿江南防洪堤,如图7所示,基底至隧道顶的距离约36.4m。长江防洪堤为重要防洪工程,因此,在施工过程中必须采取保护措施,确保防洪堤万无一失。

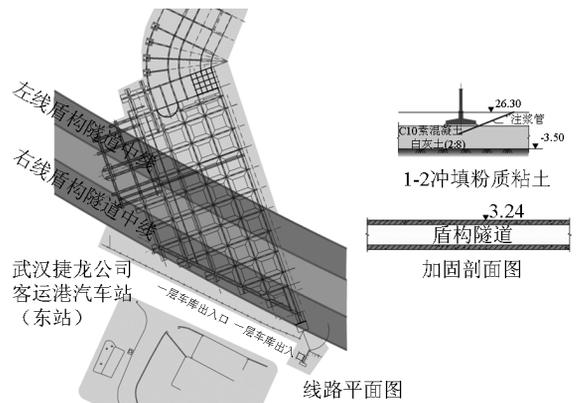


图7 线路与防洪堤的位置情况及防洪堤加固情况
Fig.7 The position relation between route and flood protection embankment and reinforcement of the latter

1) 加强盾构通过前及通过过程中监测,通过信息化施工积累盾构机掘进参数,使盾构机通过大堤时的掘进参数达到最优化,如通过信息反馈对盾构切口泥水压力、注浆压力、注浆量进行调整。

2) 由于两岸防洪堤均为刚性结构,为防止其基底与地基土局部脱离,影响防洪安全,在盾构通过过程中,采用跟踪注浆对防洪堤地基进行加固;盾构通过后,根据沉降情况及时注浆,直至大堤处于稳定状态。

4.2.2 对沿线文物的保护

长江隧道上方多为繁华路段,沿线文物较多。图8、图9给出了鲁兹故居和和平和打包厂的加固示意图。表3列出了隧道与周围保护建筑物的关系及处理方法。

表3 隧道与周围保护建筑物的关系

Table 3 The relation between the tunnel and the surrounding protected building

古建筑名称	结构类型	楼层数	竣工时间	现状	与隧道的关系	保护措施
鲁兹故居	砖木	2	1904年前	较好	左线隧道盾构顶覆土7.5 m,距右线隧道汉口工作井基坑边1.4 m	高压喷射注浆三面隔离
平和打包厂	钢混	4	1905年	较好	与右线隧道盾构结构边的距离为2.2 m,该处隧道覆土厚约7 m	高压喷射注浆墙隔离
英文楚报馆	钢混	5	1924年	较好	与明挖基坑边的最小距离约7.5 m,该处基坑开挖深度约14 m	墙侧设两排树根桩保护
盐业银行	钢混	5	1926年	较好	与明挖基坑边的最小距离约11.2 m,该处基坑开挖深度约13.3 m	墙侧设两排树根桩保护
汉口棉花仓库	钢混	4	1904年前	较好	A 匝道下穿	暗挖下穿,高压喷射注浆加固地层

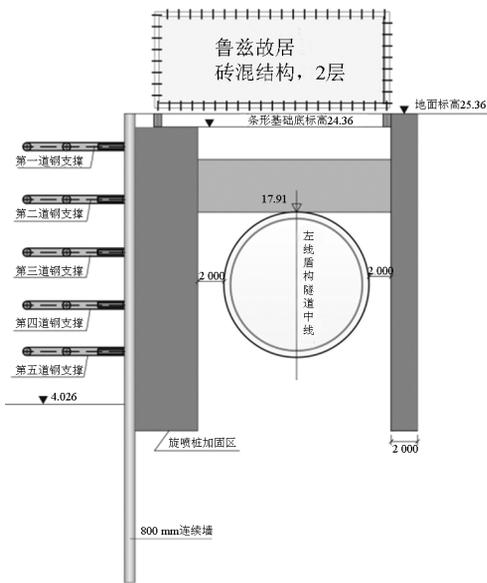


图8 鲁兹故居加固示意图

Fig. 8 Strengthening schematic of Luci former residence

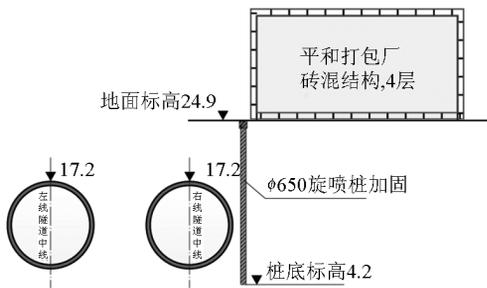


图9 平和打包厂加固示意图

Fig. 9 Strengthening schematic of Pinghe pack factory

4.2.3 对沿线非文物建筑物的保护

根据预测的地面沉降对建筑物的影响,将对建筑物的保护等级分为三级。第一级,预测沉降超过本次设计设定的标准,需采取预加固的积极保护措施。如对武汉理工大学家属楼和北京路幼儿园采取了静压桩主动保护措施。第二级,工程施工对建筑物有一定影响,但预测沉降未超过设定的标准,要求施工过程中进行监测,并根据监测结果采取相应的保护措施。如对武汉理工大学教学楼,主要采取根据施工过程中的监测情况跟踪注浆的措施。第三级,工程施工对建筑物影响很小,原则上不采取保护措施,仅需施工监测。如对华安医药有限公司综合楼、省棉花公司宿舍楼不采取保护措施,仅加强施工监测。

4.2.4 对武大铁路的保护

左线隧道于 LK4 + 951、右线隧道于 RK4 + 979 处下穿武大铁路,隧道与铁路斜交角度约 44°,如图 10 所示。该处隧道顶距铁路路基面的高差为:左线 20.3 m,右线 19.6 m。计算得到盾构下穿铁路地段,地面最大沉降量约为 14 mm,最大倾斜率约为 0.63 ‰。由于该沉降值非瞬时发生,而是随施工过程逐渐增加,施工中根据沉降监测情况随时补充道碴,保持轨面平顺性要求。根据施工测量结果,必要时对铁路线路采用扣轨加固。

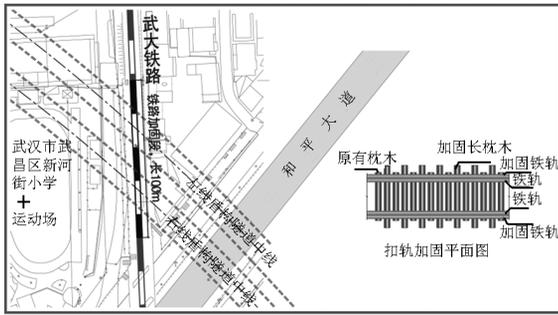


图 10 武大铁路加固示意图

Fig. 10 Strengthening schematic of the Wu - Da railway

4.3 对沿线地下管线的保护

长江隧道横穿汉口的中山大道、沿江大道,武昌的和平大道、友谊大道等 4 条主干道及汉口的胜利街、鄱阳街、洞庭街、大智路等,沿线道路地下管线密集,此外,武汉理工大学等分布有很多地下管线。为了确保隧道施工中管线的安全,在施工前对各类管线进行了详细的调查,并对各类管线的变形适应能力进行了评估,制定了变形控制标准。在此基础上,制定了地下管线的保护方案。

1)当隧道结构(如敞开段)侵入现有管线空间时,将管线就近改移。

2)当明挖结构横向或平行下穿既有管线时(如胜利街、鄱阳街、友谊大道),对管线进行悬吊保护。

3)当隧道暗挖下穿既有管线时(如中山大道、洞庭街、沿江大道、临江大道、和平大道),根据施工对管线影响程度及管线变形的允许变形值,考虑采取相应的保护措施。包括加强施工管理,控制管线变形;加强管线沉降监测,保持盾构隧道施工开挖过程中水土压力平衡,在盾构隧道施工过程中,采用同步注浆,加强注浆压力控制等。

5 结语

武汉长江隧道是长江上建成的第一条隧道,也是目前中国地质条件最复杂、工程技术含量最高、施工难度最大的江底隧道工程,中国工程技术人员在开挖这一江底隧道的过程中,成功攻克了五大世界性施工技术难题。武汉长江隧道周密的设计、精心的施工和创新的模式将为类似隧道工程的建设提供典范。

参考文献

- [1] 肖明清. 武汉长江隧道工程概况[J]. 土工基础, 2005, 19(1): 2-4

Construction technology of Wuhan Changjiang tunnel — the first tunnel under Changjiang River

Wang Mengshu, Sun Mou, Tan Zhongsheng

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] Wuhan Changjiang tunnel is the first tunnel under Changjiang River. The geological condition is very complicated with high hydraulic permeability, high water pressure, big-diameter shield, long driven distance and complicated ground and underground environment. The paper introduced the process of design and research of the project, the construction model, the overall design and general situation of the construction. Shield type select method and protection measure of the adjacent structure are emphasized.

[Key words] Wuhan Changjiang tunnel; construction model; overall design; construction