

# 玄武湖水底交通隧道施工方案的比选优化

王国权 罗国煜 李晓昭(南京大学地球科学系, 南京 210093)

**摘 要** 本文用系统分析的思想, 对玄武湖水底交通隧道的两种施工方案(明挖法与盾构法)进行了比选, 并对明挖法方案进行了优化, 最后确定了最佳方案——箱涵顶进加筑堤开槽埋管方法。

**关键词** 水底交通隧道 系统工程 玄武湖 盾构法 明挖法 比选优化 箱涵

**Abstract** Based on the thought of systematic engineering analysis, two working schemes (opencut and cover method, shield method) of Xuanwu Lake Subaqueous Highway Tunnel are contrasted and evaluated in this paper. The opencut and cover method is optimized by the authors. According to this paper, the optimum scheme is the dike construction and pipe burial method with box culvert jacking techniques.

**Key words** subaqueous highway tunnel, systems engineering, Xuanwu Lake, shield method, opencut and cover method, contrast and optimization, box culvert jacking

玄武湖位于南京市快速内环线以内的市中心地区, 湖面宽阔, 风景秀丽, 是南京市著名的风景旅游点, 但同时也严重阻碍了城区的道路交通, 使城市路网中出现了一大片“空白”。为缓解市区交通, 减少车辆绕行距离, 加强地区间的联系, 市有关部门开始着手筹建玄武湖水底交通隧道。受南京市地铁筹建处的委托, 南京大学参加了该工程的可行性论证工作。拟建的玄武湖水底交通隧道, 西与新模范马路相接, 东与新庄相接(见图 1), 双向四车道。针对该工程的施工方案, 参加论证的南京大学、上海隧道设计院等有关单位提出了两种方案, 明挖法与盾构法。

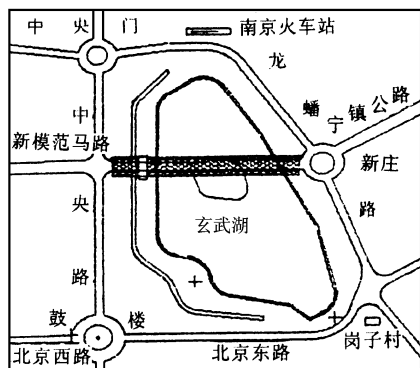


图 1 玄武湖水底交通隧道平面示意图

Fig 1 Sketch map showing the location of Xuanwu Lake Subaqueous Highway Tunnel

## 1 系统优化设计的原则与目标

城市水底交通隧道, 既在城市, 又在水下, 工程建设中涉及到交通规划、市政环境保护、地面变形、工程地质条件、经济条件等多种因素, 是一种典型的系统工程(Systematic Engineering), 其施工方案的选择应遵循一定的原则进行, 结合玄武湖水底交通隧道工程, 提出以下原则<sup>[1]</sup>:

(1) 目标原则 玄武湖水底交通隧道的关键是要解决交通问题。隧道的建成, 要尽最大限度地缓解玄武湖周围的交通拥挤状况, 这个目标是绝对不能偏离的。

(2) 地质原则 水底交通隧道建在地质体之中, 涉及到区域稳定性、地面变形、砂土液化、软土震陷、涌砂涌水、突水、开挖面失稳、有害气体等多种工程地质问题, 是一个典型地质工程。隧道施工, 要尽可能避开复杂的工程地质问题, 对可能发生的工程地质问题要有备无患。

(3) 效益原则 建设玄武湖水底交通隧道, 投资巨额, 不能很快产生经济效益, 然而其社会效益相当可观。在规划中应尽最大限度地降低工程造价。社会效益与经济效益并重。

(4) 技术原则 选取的施工方法不仅要有可行性, 而且要有可靠性, 应选用成熟的施工方法。

(5) 环境原则 工程施工过程中, 要尽可能地减少对环境的扰动。施工不能影响玄武湖周围人民的正常生产及生活, 也不能影响到隧道沿线高层建筑、地下管线及文物景观等的安全。

(6) 整体最优原则 玄武湖水底交通隧道是一个系统工程,由若干子系统构成。施工方案即为一子系统。分析问题时要从系统的整体效益着眼,局部可以不最优,但整体必须最优。

在上述思想的指导下,进行工程施工方法的比选与优化。

## 2 工程地质概况

### 2.1 地形地貌

玄武湖位于南京市区的东北面,呈纺锤状,其长轴走向为NW向。玄武湖三面环山(北、南、东),湖底平坦,水深平均为1.45m,湖区水域基本发育在三叠系、侏罗系地层和火成岩剥蚀洼地之上,基岩埋藏较深,一般35~40m。

### 2.2 地层

隧道位于第四系河流冲积沉积层中(古河道相及漫滩相),主要地层有(图2):

(1) 填土层 人工填土层分布较为普遍,厚度一般变化于2~5m之间,成分复杂,结构疏松,并含有砖瓦碎片等人工废弃物。

#### (2) 古秦淮河沉积层(Q<sub>4</sub><sup>2-3</sup>)

a 淤泥质粉质粘土层 为古秦淮河漫滩相及湖沼相沉积物,有机质成分较高,颜色为灰黑色,含水量较高,呈软塑至流塑状态,分布范围较广,有较稳定的层位,也有的呈透镜状。

b 粉质粘土层 主要为古秦淮河漫滩相沉积的粘性土层,颜色为灰黄色,呈软塑状态,含水量较高,分布范围较广。

c 粉砂层 是古秦淮河河床相沉积物,夹有细砂颗粒或夹有少量细砂薄层,偶而也夹有粉质粘土透镜体薄层,颜色为灰色,饱水,分布范围广,厚度大。

### 2.3 水文地质条件

地下工程开挖,形成新的集水廊道,水害是屡见不鲜的,水下隧道及水底工程尤其,直接关系到工程的成败<sup>[2]</sup>。在水底交通隧道施工中,水是一个很棘手的问题。玄武湖水底交通隧道施工中,面临3类水体:地表水、古河道水及下伏基岩水。

(1) 地表水(湖水) 玄武湖湖水与长江水沟通,整个玄武湖面积约4km<sup>2</sup>,按平均水深1.45m计算,水量达5.8×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>。

(2) 古河道水 湖内有一条埋藏不深的古河道,分布有厚度不等的粉细砂层及粉质粘土层,粉砂中地下水含量较大,为地下水富集带,单井涌水量最大可达2000~5000m<sup>3</sup>/d。

(3) 下伏基岩水 幕府山—九华山断裂(F<sub>2</sub>断

裂)沿南北向穿越玄武湖,与隧道轴线斜交。据现有资料,F<sub>2</sub>断裂为张扭性断裂(图2),在下伏闪长岩中切割深达20km,沿走向延伸较长,规模较大,且伴生羽状小断裂。F<sub>2</sub>富水,具有承压性,涌水量150~250m<sup>3</sup>/d。

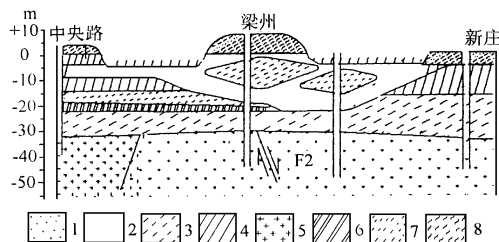


图2 中央路—新庄地质剖面图

Fig 2 Geological sectional view from Zhongyang road to Xinzhuang

1—闪长岩; 2—粉砂; 3—粉质粘土; 4—淤泥质粉质粘土;  
5—安山岩; 6—粘土; 7—粘质粉土; 8—人工填土

## 3 方案比选

玄武湖水底交通隧道的施工方案,涉及到工程造价、工程进度、工程质量、工程对环境的影响等关键问题,因而施工方案的比选优化显得尤为重要。据目标原则,隧道的建成,要最大限度地缓解玄武湖周围的交通拥挤。按照这个原则,就必须把隧道西端的出入口限制在中央路以东,使其能够同时分流新模范马路和中央路的车流。中央路东侧距新庄1590m。按照隧道公路设计规范,隧道最长坡度不能超过3.5%。

### 方案一:盾构法方案

隧道全线共设引道段、矩形段、圆形段。圆形段用盾构法施工,盾构直径为11.3m。盾构法施工比明挖法相比,具有以下优越性<sup>[3]</sup>: (1)在盾构的掩护下进行开挖和衬砌作业,有足够的施工安全性; (2)施工作业不受气候条件的影响; (3)产生的振动、噪声等环境危害较小,环境效益好; (4)对地面建筑物及地下管线的影响小; (5)施工期间,不影响玄武湖的风景,可正常开放。但用盾构法施工,存在隧道埋深大,穿越城墙难等问题。

无论是用气压式盾构、泥水加压盾构,还是用土压平衡式盾构,都存在一个盾构内压与周围土体压力平衡的问题,若内压大于外压,则会造成“冒顶涌水”的工程事故。在盾构施工中,为确保内外压力平衡,国际上一般要求隧道上覆土厚度为1~1.5倍盾构直径。按上覆土为10m(0.88D)设计的盾构法隧道方案如图3(水深按1.45m计算)。隧道最大埋深为水面下21.3m,盾构施工的水平距离仅为640m,曲线路径约为670m。

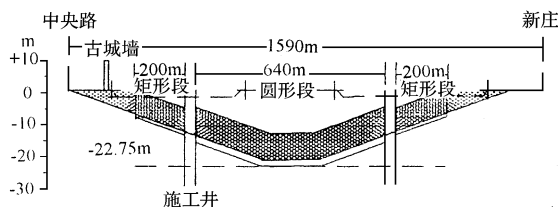


图 3 盾构法方案剖面图

Fig 3 The sectional view of shield method scheme

由上图可知, 盾构法方案明显存在以下问题: (1) 盾构施工距离短, 因而使盾构段单位造价很高; 隧道埋深过大, 使隧道建成后的照明通风及营用费用较高, 不符合效益原则。 (2) 二竖井建在湖中, 深入水下约 35m, 施工中存在砂土液化、涌砂涌水、墙体失稳等工程地质问题, 施工难度大; 湖中约有 400m 的矩形段, 只能用明挖法施工, 施工中遇到与明挖法方案同样的工程地质问题; 隧道埋深大, 使工程地质问题复杂化, 可能存在下伏基岩裂隙水及断裂水顶破隧道下伏土, 造成突水的危险。不符合地质原则。 (3) 没有解决隧道如何穿越古城墙的问题。由上面的分析可知, 按隧道上覆土 10m 设计的隧道方案是不理想的。

隧道上覆土厚度是否可以减小呢? 南京某水底隧道上覆土厚 0.6 倍盾构直径, 在盾构施工中几次出现险情, 使工期延长, 造价增加。上海地铁延安东路隧道, 是继江浦路隧道之后的第二条穿越黄浦江的水底隧道, 隧道施工必须穿越 500 余 m 黄浦江江底, 用泥水平衡式盾构施工, 盾构直径为 11.3m。隧道上覆土较浅, 最浅处仅为 5.8m, 为隧道直径的 0.51 倍。为确保施工安全, 投入了大量的技术力量和物力。在最小覆土处还不得不预先向江中抛填 2m 厚的粘性土, 以增加上覆土厚度。由于运用了各种技术措施, 才使盾构闯过了“冒顶涌水”的风险。可见, 要减少上覆土厚度是一个很棘手的问题。按照最大坡度 3.5% 计算, 在古城墙东侧隧道底面距地面仅 5.25m, 可见要用盾构施工穿越古城墙, 是绝对不可能的, 要穿过古城墙还得用其它方法, 这就使工程造价大大提高, 不符合效益原则及整体最优原则。工程风险大, 也不符合技术原则。

此外, 考虑到玄武湖是人工湖, 自唐代以来多次废湖为田, 又历经战乱, 可能在土层中存在废井、巨石等巨形人工障碍物及瓦斯包, 对盾构施工极为不利。盾构施工其造价也很高, 在国外和台北、香港等地, 一般造价约为 1 亿美元/公里。

从上面的分析可知, 尽管盾构法对环境扰动小, 符合环境原则, 但它不符合地质原则、效益原则、整体最优原则及技术原则, 在本工程中是不可选的。

#### 方案二: 明挖法方案

全线分为引道段、矩形段及古城墙段(图 4)。湖中部分采用先筑堤然后开槽埋管的方法构筑隧道。为确保隧道整体稳定性及营用安全, 矩形段上覆土不少于 2m (清淤后, 规划湖底深度下 2m)。与盾构法相比, 明挖法具有隧道埋深浅、线路短、照明和通风代价小, 工程造价和营用费用低, 使用效益好等优点。尽管明挖法对环境扰动大, 不符合环境原则, 但它比较符合地质原则、效益原则、技术原则和整体最优原则, 是本工程的可选方案。

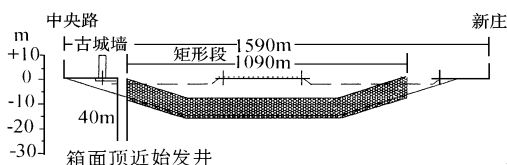


图 4 明挖法方案剖面图

Fig 4 The sectional view of open cut and cover method scheme

#### 4 明挖法的优化

在明挖法施工过程中存在以下两个问题: (1) 地表水体的隔离, (2) 古城墙基础的穿越。

据玄武湖管理处的负责同志介绍, 玄武湖曾在 50 年代进行过大规模的人工清淤(先排水, 后清淤)。目前玄武湖湖底淤泥深约 1m, 水质污染较为严重, 市有关部门有近期清淤整治的计划。如果隧道施工能和清淤工程相配合, 则就很好地解决了隧道施工中的隔离地表水体难的问题, 同时也相对降低了隧道施工对环境的扰动及工程造价, 也使工程施工更加安全。

南京古城墙是国家重点文物保护单位, 施工中必须确保其安全。明挖法方案中拟采用箱涵顶进技术穿越古城墙基础。为确保万无一失, 箱涵顶进前进行超前管棚支护。具体做法是, 在箱涵设计外侧顶进企口相连的直径为 609mm 的钢管, 使之形成“门”形管棚, 在钢管外侧进行注浆加固(图 5)。分析可知, 玄武湖水底交通隧道施工方案为: 箱涵顶进加筑堤开槽埋管方案, 且隧道施工与玄武湖清淤工程同时进行。

#### 5 结语

盾构法作为一种先进的施工技术, 很适合于在大 (下转第 37 页)

从图还可知:王家港油田在现有的基础上,还有潜力可控,可进一步扩大勘探范围和勘探层位。

由此分析可知:本区生、储、盖、运、聚组合配套好。东营运动奠定了东营凹陷与油气运聚有关的古地下水动力场的基本格局,这种格局至今没有发生本质上的改变,东营时期的古水文地质条件决定了地下水在油气运聚中所起的作用。

本区油气大量生成运移聚集是在 Ed 末期后,地下水流动方向便是油气运移的方向,东营凹陷油气运移聚集主要与古沉积地下水的行踪密切相关。从东营凹陷古地下水动力场出发,分析其与已知油田所处的地下水动力环境可知,已知油田均处在有利的地下水动力环境,具较好的一致性。

#### 4 结语

通过东营凹陷油气运聚古地下水动力场剖面数值模拟,粗略建立了一套古水文地质参数再造、模拟古初始值恢复、剖面数据模拟与油气勘探有利地段预测的方法和工作程序。模拟结果显示:剖面已知油田得以较好的模拟吻合,且有新发现。

需要指出的是:油气藏的形成是一个非常复杂的过程,所预测的这些油田均是平面古地下水动力场和剖面油气运聚的古地下水动力场数值模拟推断的,仅可作为东营凹陷油气田进一步勘探开发的水文地质依据。还要说明的是:原拟以油气运聚古地下水动力场模拟的四条剖面为基础,勾划出平面古地下水动力场,进而与  $N_2$  古沉积地下水动力场配套比较,分析其与油气运聚的关系,因时间关系,没能完善此工作。

总之,本文通过地质条件分析,进行的油气运聚古地下水动力场剖面数值模拟是可行的。由于时间、资料等的限制,仅进行了初步有益的探索;另外,在数学模型上应考虑泥岩的压出释水量,以使其臻于完善。

本文撰写,曾得到陈明佑教授、钟佐邇教授、沈照理教授、吴永锋博士的悉心指导,资料由胜利油田地质科学研究院提供,谨此一并表示感谢!

#### 参考文献

- 1 薛禹群主编 地下水动力学原理 北京:地质出版社,1986
- 2 J. Toth Models of subsurface hydrology of sedimentary basins, proceedings third Canadian/American conference on hydrogeology: hydrogeology of sedimentary basins Application to exploration and exploitation, banff, alberta, canada, 1986
- 3 王秉海,钱凯主编 胜利油田地质研究与勘探实践 北京:石油大学出版社,1992
- 4 刘方槐,颜婉莎 油气田水文地质学原理 北京:石油工业出版社,1991
- 5 钟佐邇 环境水文地质学 北京:地质出版社,1988
- 6 地质矿产部水文地质工程地质研究所等 油田古水文地质与水文地球化学——以冀中坳陷为例 北京:科学出版社,1987

(1997 年 8 月收稿)

(上接第 18 页)

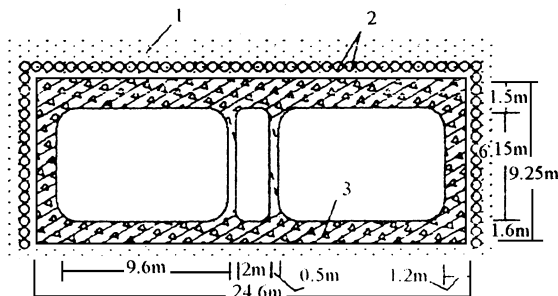


图 5 箱涵断面图

Fig 5 The sectional view of box culvert

1—注浆加固地带;2—钢筋管棚;3—钢筋砼箱涵

城市这种脆弱的工程地质环境(Vulnerable Engineering-geological Environment)中施工,在上海地铁工程

中,盾构法得到了广泛应用,取得了明显的社会效益,但它不适合于玄武湖水底交通隧道这个特定条件下的工程。一般地认为,在大城市不适合用明挖法施工大型地下工程,但对玄武湖水底交通隧道这个具体的工程,明挖法是适合的。地下工程的施工方法,关系到线路的选择、工程造价、施工安全性,甚至直接关系到工程的成败,施工方案的选择,是一件很慎重的事,要具体问题具体分析,不可盲目照搬。

#### 参考文献

- 1 刘传正,张明霞,高道华 链子崖危岩体 T8—T6 缝段防治工程的比选优化,环境地质专辑(三)
- 2 陈成宗 隧道及地下工程工程地质研究的进展,水文地质工程地质,1989. 4
- 3 大百科全书(土木工程),北京:百科全书出版社

(1997 年 10 月收稿)