

浅埋暗挖技术在永定河倒虹吸工程中的应用

李德文 穆永梅

(北京市水利规划设计研究院 100044)

1 工程概述

永定河倒虹吸是南水北调中线工程最早开工的项目之一，是北京段的重要建筑物。倒虹吸位于北京市丰台区，在卢沟桥下游约3 km处，先后穿越大宁水库副坝、大宁水库、永定河右堤、永定河主河道，于末端穿越永定河左堤和新建的五环路及辅路。五环路车多流量大，不允许断路施工。为保障五环路的正常交通，采用暗挖法施工。永定河倒虹吸断面采用4孔3.8 m × 3.8 m 钢筋混凝土箱涵，两孔一联。暗挖段尺寸不变，为方便施工，分4孔采用平顶直墙法暗挖。暗挖段全长87m（左2孔86m，右2孔88m），与五环路交角82°55'，最大覆土深度11.9m。

暗挖层工程地质结构为砂砾双层结构。卵砾石成分以辉绿岩、安山岩等岩浆岩为主，灰岩为辅。粒径一般3~12 cm，有中细砂、细砾及黏性土充填，局部夹壤土。含水量14.78%，内摩擦角35°，渗透系数 $(9.26 \sim 11.6) \times 10^{-2}$ cm/s。多年平均地下水位低于暗挖影响范围，不需进行施工排水。

2 平顶直墙法设计

永定河倒虹吸断面采用4孔3.8 m × 3.8 m 钢筋混凝土箱涵，暗挖段涵身尺寸不变。如采用传统拱形暗挖法，受力结构较好、施工工艺成熟、技术可靠，但开挖方量大、需要分期浇注二衬结构或改变涵身结构形式。设计中采用了平顶直墙法分4孔单独暗挖。该方法可以减小开挖空间和方量、避免拱形结构衔接和局部拆除的不便与浪费，并克服了施工过程中由于支护替换过多不能形成整体连续拱、受力转换复杂的缺点，不需要改变涵身结构形式。如开挖中一次支护的变形偏大、内部应力水平过高，可采用中隔支撑以确保一次支护的安全。

由于倒虹吸横断面开挖跨度大，将近22 m，位于交通十分繁忙的五环路下，暗挖施工几乎是在连续不断的活荷载作用下进行，并且五环路面沉降要求很高，如何有效地控制地面沉降是设计过程中首先要考虑的问题。二次衬砌实施前由初衬承担全部土压力及地面荷载，此时大部分沉降已经形成，因此初衬支护效果显得至关重要。由于卵

砾石地层胶结不好，自稳能力差，不易成拱，但注浆效果好，设计中考虑了大管棚和小导管注浆2种方法。由于部分卵砾石粒径较大，如采用大管棚加固，不易成孔且成本较高。经综合比较，采用小导管超前注浆的方法，在开挖前注浆加固土体。由于初衬净空及开挖跨度达5.6 m，为确保掌子面稳定和及时支护，采用上下台阶法开挖。由于平顶结构受力不如拱形结构，增设中隔支撑，以减小洞室的开挖跨度。

暗挖段结构设计采用了理论计算与工程类比相结合的方法，采用复合衬砌型式。考虑土压力及地面荷载，初衬采用30 cm厚C35喷射混凝土，二衬采用60 cm厚C30现浇混凝土，每孔自成框架。初衬预制格栅采用4根 $\phi 22$ 钢筋，榀距50 cm，榀间用内外双排 $\phi 22$ 纵向连接筋连接，格栅双侧挂 $\phi 6$ 间距100 mm × 100 mm的钢筋网。注浆小导管采用 $\phi 32$ 钢花管，长1.7 m，导管一端做成尖锥形，侧壁交叉钻 $\phi 8$ 的孔，外露20 cm与格栅焊接。掌子面小导管长1.2 m。上半幅格栅底脚设注浆锁脚锚杆，采用 $\phi 40$ 钢花管，长2.5 m，端部与格栅焊接。水平支撑采用焊接H钢H200 mm × 150 mm × 4.5 mm × 6.0 mm，垂直支撑采用2根20槽钢加10 mm厚缀板焊接。掌子面喷浆厚5 cm，为水泥浆。超前小导管及掌子面所注浆液为水泥水玻璃混合浆，浆液配比及注浆终压等注浆参数可根据实际情况进行调整。施工步骤如下：①开挖工作面，洞门支护；②1号洞掌子面喷浆、超前小导管注浆、掌子面注浆；③1号洞上台阶土体开挖，步长50 cm，架设上部格栅及钢支撑，打锁脚锚杆注浆，挂网喷C35混凝土，预留灌浆孔；④重复过程②、③，错台开挖下台阶土体，架设下部格栅及钢支撑、挂网喷C35混凝土；⑤重复过程②、③、④，每2 m回填灌浆，开挖15 m后开始3号洞开挖，做法同1号洞；⑥1、3号洞全线贯通后每3 m跳仓拆除十字钢支撑，做ECB防水层，浇筑二衬结构，预留灌浆孔，施工缝内粘贴BW-II型止水条，每2 m回填灌浆；⑦开挖2号洞，做初衬支护，错开15 m开挖4号洞，做法同前，全线贯通后做二衬结构。

地表沉降量的大小以及施工的成败都与施工过程有着

密切的联系，开挖过程中要求严格遵守“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”的施工原则。快速施工，保证6 h内完成一个循环；施工过程中实时监测地表沉降、拱顶沉降、水平收敛、涵顶应力，绘制时态曲线，对实测数据进行回归分析，预测可能出现的最大沉降及收敛值，进行掌子面地质观测，核对有无变化，及时进行信息反馈，本着动态设计的原则，及时调整支护参数。

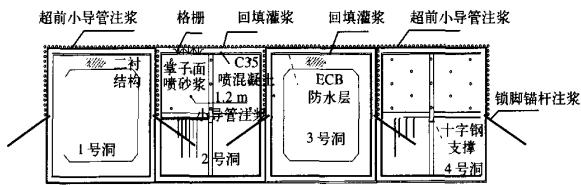


图1 初衬横剖面示意图

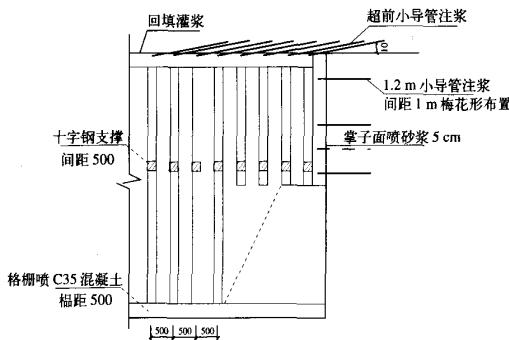


图2 初衬纵剖面示意图

3 动态模拟

采用基于弹塑性增量理论的有限元程序SAGE进行校核，考虑混凝土强度、弹模、泊松比等参数随龄期的增长，对超前注浆、台阶开挖、喷混凝土支护、支撑拆除等施工过程进行了31个增量步的动态模拟。由于模拟过程复杂、数据工作量大，用单孔开挖模拟的成果估算4孔方涵的沉降量。图3为边孔单孔施工二衬浇筑完成后的位移等值域图。

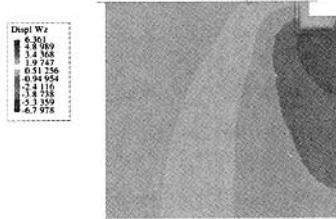


图3 二衬浇筑完成后的位移等值域图

由图3可以看出单孔开挖地表最大沉降量4.53 mm，从单孔中心线向两侧衰减。按照其余3孔方涵距计算单孔的不同距离取相应的衰减沉降量进行叠加，所估算的沉降量

为14.7 mm。其余3孔方涵开挖时，由于已支护方涵的存在，沉降会有所减小。因此，用这种方法进行叠加，所得到的最大位移沉降量是偏于安全的。

4 暗挖施工

暗挖工程于2004年10月底开工，2005年4月底全部完成。施工过程中本着动态设计的原则，根据具体隧洞开挖及沉降监测结果作了如下调整：

(1) 为了加强超前注浆效果，加快封闭速度，将超前注浆浆液由水泥水玻璃混合浆调整为改性水玻璃浆。由于改性水玻璃浆凝固时间短、早期强度大，超前支护效果较好，同时加快了支护封闭的速度。

(2) 为了尽快封闭成环，防止掌子面坍塌和漏浆，原设计中上台阶用掌子面喷浆及小导管注浆的方法，垂直开挖。施工过程中发现，由于暗挖深度范围内均为原状土，开挖面较稳定，用预留核心土的方法同样能防止掌子面坍塌。由于改性水玻璃浆凝固时间短及核心土的作用，并未出现掌子面漏浆现象。

(3) 设计中十字钢支撑间距为0.5 m，由于间距很短，对洞内交通和土方运输造成一定困难。施工中将做好的间距为0.5 m的钢支撑隔锯切断，在断裂面监测变形，由于初衬强度较大，变形不明显，于是将格栅间距调整为1 m。

(4) 防止地面沉降过大，设计中建议每3 m跳仓拆除十字钢支撑，浇注二衬混凝土。施工中根据变形监测结果将一次拆除长度延长为9 m，有效地减少了二衬施工缝的数量和施工复杂程度。

变形观测是指导暗挖工程动态设计与施工的主要依据。在初衬结构中预埋了变形观测点，观测洞内水平收敛和拱顶沉降。左堤与五环路主路间，垂直于涵的方向布置了4排总计33个地面沉降观测点，动态观测施工过程中的地面沉降。随着涵洞的掘进，地面沉降呈规律性变化。涵洞纵向开挖到达测点附近时，地面沉降加大明显，随着初衬与钢支撑的实施，地面沉降速度减慢。洞顶地面沉降横向叠加效应明显，无论是单洞还是群洞均以开挖中线为中心向两侧衰减。最大地面沉降发生在左堤堤顶，时间为2005年1月25日，最大地面沉降量为14.5 mm，与计算预测值14.7 mm基本吻合。

5 结语

本工程将平顶直墙暗挖技术应用于水利工程，有效地控制了地面沉降，确保了五环路的畅通和安全，取得了很好的社会效益和经济效益。施工过程中本着动态设计的原则，根据变形监测结果，对原始设计进行了优化，积累了一些在砂卵石地质条件下采用平顶直墙暗挖技术建造矩形涵洞的设计、施工经验，供类似工程参考。

(责任编辑：刘培英)