

# 深层排水调蓄隧道系统关键技术问题分析

胡 龙<sup>1,2</sup>, 戴晓虎<sup>1</sup>, 唐建国<sup>2</sup>

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125)

**摘要:** 近年来,随着我国城市雨水管理问题日益凸显,深层排水调蓄隧道技术日益受到关注。对当前国内外深隧工程案例进行了简要介绍与分类,阐述了深隧系统的原理、组成与运行方式,并基于当前我国城市排水设施建设现状,对深隧系统的工程应用关键技术问题进行了分析,以期类似工程的建设与管理提供参考。

**关键词:** 深层排水调蓄隧道系统; 城市雨水管理; 关键技术问题

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)08-0017-05

## Analysis of Key Technical Problems of Deep Drainage Tunnel System

HU Long<sup>1,2</sup>, DAI Xiao-hu<sup>1</sup>, TANG Jian-guo<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract:** In recent years, with the increasingly prominent issue of municipal stormwater management in China, the deep storage drainage tunnel technology has attracted more and more attention. This paper gives a brief introduction and classification of current deep tunnel engineering cases. The principle, composition and operation mode of the deep tunnel system are elaborated. Based on the current situation of municipal drainage facility construction in China, the key technical problems of deep tunnel system engineering application are briefly analyzed, which provides reference for the construction and management of similar projects.

**Key words:** deep drainage tunnel system; urban stormwater management; key technology problem

近年来,随着全球气候趋暖以及我国城市建设的高速发展,我国城市雨水管理问题日渐凸显,“小雨河道黑臭,大雨城市内涝”的现象较为突出,引起政府和公众的高度关注。针对这些问题,国家层面近几年罕见地密集出台了系列相关政策、法规以及技术指南等,要求以“海绵城市建设”为目标,通过

切实有效的工程措施和非工程措施妥善解决当前突出的城市雨水管理问题,《室外排水设计规范》(GB 50014—2006,2016年版)对城市雨水系统的设计标准提出了更高的要求,基本与发达国家类似城市相当。但是,由于我国过去“重地上、轻地下”的城市开发建设模式,造成城市排水设施基础薄弱、历史欠

账较多;加上城市建成区建设密度高、地表硬化率高、地下管线众多、轨道交通网络纵横交错等特点,采用全面翻排水管道来提高城市建成区雨水系统设计标准的方案,技术经济性差,实施难度太大,近年来全国各地的工程实践也验证了这一点。在此背景下,在发达国家应用较为成熟的深层排水调蓄隧道技术,以其具有线性收集特征、调蓄容量可扩展、兼顾污染物控制与雨水系统提标功能以及环境影响相对较小等特点,逐渐受到关注<sup>[1~4]</sup>。国内多座城市开展了工程应用的前期研究,广州和上海率先开展工程试点建设。但与此同时,因工程投资大、能耗较高以及利用率较低等缺点,该技术的工程应用也颇受争议。笔者对国内外典型深隧工程案例进行了调研,介绍了深层排水调蓄隧道功能目标与类型、构成与运行方式,分析了其工程化应用需要研究的关键技术问题,为国内类似工程的研究及应用提供参考。

## 1 深层排水调蓄隧道系统功能目标与类型

综合国内外既有工程案例,深层排水调蓄隧道一般指埋设深度较大(一般超过地下40 m)、管径较大的城镇排水调蓄隧道。其主要的工程目标是解决城市出现的雨水管理问题,如合流制系统的雨天溢流污染问题、超标降雨带来的城市内涝问题等,也有用于污水输送的专用型隧道,如新加坡 DTSS 一期及在建的二期工程。目前,国内外深层排水调蓄隧道系统工程已有 30 余例成功应用,在城市的防洪排涝或污染控制中发挥了较大的作用。典型的如美国芝加哥 TARP 项目、日本东京外围排放隧道、美国 Atlanta West Area 合流制溢流污染控制隧道、香港的雨水排放隧道、马来西亚吉隆坡的“SMART 隧道”以及新加坡 DTSS 污水输送专用隧道等。按功能目标区分,这些已建的深层排水调蓄隧道主要可分为三种类型:防洪排涝型隧道、污染控制型隧道、功能复合型隧道。

### ① 防洪排涝型隧道

根据服务对象不同,防洪排涝型隧道又可分为排涝隧道和泄洪隧道。排涝隧道主要收集、调蓄超过本区域现有排水系统排水能力的雨水径流(即超标雨水产生的径流),以达到降低区域内涝风险的目标;泄洪隧道主要分流上游区域洪水并排放至下游水体,减少城市的洪涝灾害。典型的如香港雨水排放隧道、东京外围排放隧道以及美国沃勒河排洪

隧道等。

### ② 污染控制型隧道

污染控制型隧道也有两种类型:污水输送隧道以及溢流污染控制型隧道。其中污水输送隧道其实是一种埋深较大的污水输送干管,仅具有污水输送功能,如新加坡 DTSS 一期及二期工程。工程应用较多的溢流污染控制隧道主要服务于老城区合流制区域,用于收集并存储降雨过程中合流制区域超过截流能力的溢流污水,或部分新建区分流制系统的初期雨水;雨停后将其输送至污水厂处理后排放。典型的如:英国 LEE 隧道和泰晤士河 Tideway 隧道、澳大利亚悉尼 Northside Storage 隧道、美国 Atlanta West Area 合流制溢流污染控制隧道等。

### ③ 功能复合型隧道

功能复合型隧道通过合理的工程设计和运行管理,兼具防洪排涝、溢流污染控制、城市交通等复合功能。典型的工程案例如美国芝加哥 TARP 项目,除控制合流制溢流污染外,还兼顾城市的内涝防治;马来西亚吉隆坡的“SMART 隧道”则将高速公路隧道与泄洪隧道叠加设计,实现泄洪排涝与城市交通功能的结合。国内试点建设的广州东濠涌隧道、上海苏州河深层调蓄管道工程也是兼顾溢流污染控制和城市内涝防治功能的复合型隧道。

在前述三种类型的深层排水调蓄隧道中,功能复合型隧道的工程案例最多,且绝大部分主要用于解决城市雨水带来的问题。虽然国内多座城市相继开展相关研究或工程试点建设,但是总体来说,深层排水调蓄隧道的工程应用在国内还处于起步阶段。

## 2 深层排水调蓄隧道系统组成与运行方式

### 2.1 原理与组成

深层排水调蓄隧道系统原理如图 1 所示,主要部分构成见表 1。

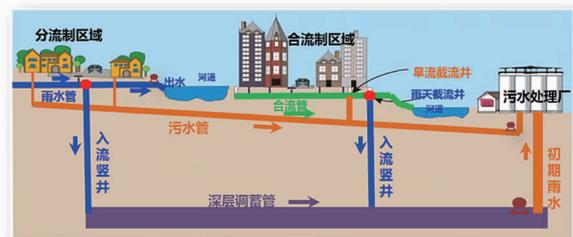


图 1 深层排水调蓄隧道系统与现有浅层排水系统耦合关系

Fig. 1 Coupling relationship between deep drainage tunnel system and existing shallow drainage system

表1 深层排水调蓄隧道系统的主要组成部分

Tab. 1 Main components of deep drainage tunnel system

组成部分	主要功能
截流井与入流管	用于将现状浅层排水系统的合流污水、初期雨水或超标雨水分流至深层排水调蓄隧道系统
预处理设施	根据深层排水调蓄隧道系统的功能目标,需要采取相应的预处理措施,如格栅、沉砂等处理单元,用于去除大的杂质,减少调蓄管淤积
入流竖井	用于将截流的合流污水、初期雨水或超标雨水转输送至深层排水调蓄隧道内,并进行消能
深层调蓄隧道	储存并输送合流污水、初期雨水或超标雨水
末端超深泵站	将调蓄管内存储的合流污水、初期雨水或超标雨水排空
调压井	平衡调蓄隧道系统的气压,排除隧道内的气体
附属设施	包括通风换气系统、除臭系统、电气与仪表监控系统、维护管理系统等

## 2.2 典型的运行方式与特点

深层排水调蓄隧道系统建成后,将与现有浅层排水系统耦合构成城市的立体式排水系统,共同承担城市排水任务。其运行方式因功能目标不同而略有差异。以合流制溢流污染控制型为例,其典型的运行方式为“先截、后蓄、再排空”,即:①降雨初期雨量较小时,充分利用合流制系统现状截流能力,将截流倍数以内的合流污水送至污水厂进行处理;②随着降雨过程的继续,为避免对河道水环境造成冲击,超过现有系统截流能力的合流污水通过截流井进入深层调蓄隧道蓄存,直到深层调蓄隧道蓄满后再开启现有合流制系统的入河排放模式;③降雨结束后,利用下游污水总(干)管空余能力将深层调蓄隧道蓄存的合流污水排至污水厂进行处理,隧道排空后为下一次运行做好准备。

## 3 深层排水调蓄隧道系统关键问题分析

深层排水调蓄隧道系统具有埋设深度大、进水量变化幅度大、明满流交替的运行方式,以及与现状浅层排水系统耦合联动等特点,多种因素叠加导致该系统有系列关键技术需要研究并加以解决,才能保障系统运行安全,充分发挥工程效益。虽然深隧系统在国外成功应用的案例较多,也发挥了较好的工程效益。但由于不同城市之间的气象条件、水文地质、排水系统的建设与运行管理方式等均存在差异,所以不能完全照搬国外的成功经验。将深层

调蓄隧道技术用于我国城市排水系统提标改造或溢流污染控制,还需要因地制宜,结合城市排水系统建设和运行情况,深入研究各类关键技术,尤其是排水工艺、工程水力学、结构与施工、运行管理与调度等方面。

### 3.1 排水工艺

深层排水调蓄隧道系统作为现有浅层排水系统功能的补充和提升,其主要目标是解决溢流污染控制和内涝防治等城市排水问题。因此,对排水工艺的研究尤其重要,关系到深隧系统工程目标的实现与工程效益的发挥。以笔者在上海、成都等城市深隧工程方案的研究经验分析,排水工艺有许多关键问题值得深入研究,其中尤为重要的可体现在“截、除、消、排”等几方面。

① 截:主要是指系统的截流点和截流方式选择。根据不同的功能目标,深隧系统和现状浅层系统截流点有所差异,截流方式也不同。以控制溢流污染为目标的深隧系统,通常在现有浅层系统末端设置接入点,将超过系统截流能力的降雨初期雨水截流进入深隧系统即可,一般可采用“堰、闸”结合的截流方式;而以防洪排涝为目标的深隧系统,则需在现有浅层系统的中前段部分设置截流点,将超标雨水接入深隧系统,通常可通过闸门控制的方式即可;如果二者均需兼顾,或者排水系统实际运行水位高于设计水位,则截流点及截流方式更加复杂,需要通过计算机水力模型进行模拟分析与验证。

② 除:截流进入深隧系统的水是否需进行除渣、除砂也是值得研究的问题。从国外已建工程案例分析,并没有明确的预处理原则和方式。芝加哥TARP工程采用“直接跌水”的方式,将现有浅层排水系统的超标雨水或溢流污水引入深隧系统;香港的雨水排水隧道采用“格栅”的预处理方式;国内广州东濠涌深隧试点工程则采用“格栅+沉砂”的预处理方式。是否需要采用除渣、除砂等预处理工艺,应结合工程目标、现状排水系统水质水量特点及深层隧道调蓄系统运行控制策略等综合比较分析确定。此外,受系统截流量变化幅度大、埋设深度较深、用地限制以及运行管理需求等因素影响,常规的格栅除污机和沉砂池是否适用也值得商榷。因此,深层排水调蓄系统的前置预处理工艺及其设备选型也需要深入研究。

③ 消:深隧系统的“消”涉及入流竖井的消能

及消声。由于深层隧道埋深较大,竖井入流过程中的消能问题和较大落差产生的噪声问题应受到高度重视,处理不当将影响到工程的结构安全和正常运行。另外,因入流竖井一般设置在城市建成区内,如何减小竖井入流过程中产生的噪声影响也需要认真研究。

④ 排:深隧系统的“排”涉及“气、水、泥”三方面,主要指“系统排气”、“隧道排空”以及“底泥清淤”等。其中,系统的排气是关系到系统能否正常运行的关键因素,多座竖井入流条件下,如隧道内气体无法及时排除则将会产生较大危害。隧道排空时间需要根据下游排水系统接纳能力确定,排空时间较长,不但影响到系统工程效益的发挥,隧道内存储的溢流污水或初期雨水会厌氧氧化而产生臭气,带来新的环境问题;排空时间较短,则下游系统的负担显著增加。此外,由于埋深较大,系统末端一般需设置提升泵站。提升水泵具有流量小、扬程超高、转速高等特点,目前市政领域常用的水泵不能满足要求,对水泵等设备的选型也需要广泛调研与深入研究;隧道排空后,其底泥的清淤也需要结合前置预处理、分段冲洗措施以及机械检修等手段综合考虑,否则会影响到调蓄容积的高效利用。

### 3.2 工程水力学

由于超埋深、运行水量不可控且变化幅度大以及交替运行等因素,导致深层排水调蓄隧道的工程水力学问题异常复杂,目前成功应用的工程案例几乎都通过物理模型和数值模拟对工程水力学进行了研究。其主要涉及两方面问题:

① 入流竖井的水力特性,包括入流方式、水流流态与流速分布、水面线与压强分布、排气方式和气流速度。通过研究确定合理的入流方式以确保不同入流流量可平稳输送至深层调蓄隧道内,避免出现空化空蚀、气体顶托等现象;在入流过程中尽可能少掺气,且可最大限度消能消声,减少对结构的冲击、喘振等。

② 深层调蓄隧道内部水力学特性,包括不同入流工况条件下气固液三相迁移规律、明满流交替运行水力瞬变特性以及滞留气团运动特性等。隧道内的滞留气团危害不容忽视,轻则会影响到调蓄容量的利用、影响入流效果、气团破裂对隧道结构壁产生危害,重则会因“气爆”发生安全事故。如1997年7月13日,美国明尼苏达州 Minneapolis 调蓄隧

道内滞留气团发生“气爆”而导致水流冲出地面以上近10 m高(见图2)。



图2 美国明尼苏达州 Minneapolis 调蓄隧道“气爆”事件  
Fig. 2 Gas explosion of Minneapolis tunnel in Minnesota, America

### 3.3 结构与施工

由于深层排水调蓄隧道系统一般设置在城市建成区内,建筑林立,大型市政设施众多,加上深层隧道的超埋深以及明满流交替运行,这些不利因素对隧道结构与施工提出了前所未有的挑战,结构受力、抗浮、防水、防腐、关键节点连接以及施工工艺等都将是技术难题。

① 入流竖井是超深超大基坑,体量巨大,通常采用地下连续墙工法,然而在城市建筑密集区域实施该工法往往没有施工场地,且面临成槽困难、接头防水、结构稳定等诸多挑战。

② 调蓄隧道异于常规盾构地铁和车行隧道,结构内壁承受不同范围和深度的水压力,且处于明满流交替运行状态,隧道结构受力及防水、防腐等将面临极大挑战。

③ 调蓄隧道工程规模较大,隧道推进及管片拼装的效率极大地影响着工程进度和实施情况,需要对其中涉及快速接头、同步推进拼装技术进行研究。根据工程功能需求,调蓄管涵需要与入流井或通风井进行连接。受不同的建设条件限制,调蓄管涵顶部与竖井直接连接或调蓄管涵与侧面竖井连接技术等也值得深入研究。

### 3.4 运行管理

对管理单位而言,深层排水调蓄系统的运行管理是一项全新的技术挑战,涉及到深层排水调蓄系统与浅层排水系统的整体调度,浅层与深层流量的合理分配与控制,与气象雨情、接纳水体的联动等方面。深隧系统承担的功能越多,耦合的系统越多,则

运行和调度将越复杂。通常情况下,需要建立集地理信息系统、地下排水管网系统、深层排水调蓄系统以及耦合的数字化模型系统,进行各种运行工况的模拟与分析,才能为运行管理和调度提供技术支持。

当然,除上述典型问题外,系统的通风换气与臭气控制系统、电气与仪表控制系统、结构与设备的防腐等方面,也需要深入研究。总之,由于深层排水调蓄隧道埋设深度大、进水流量变化幅度大、明满流交替的运行方式,以及与现状浅层排水系统耦合联动等特点,导致其面临系列的复杂技术难题,需要从宏观到局部、从整体到细节进行深入研究与分析,并通过物理模型和数学模型进行验证与校核,才能确保实现工程建设目标,并充分发挥工程效益。

#### 4 结语

① 虽然深层排水调蓄隧道系统存在工程投资大、能耗较高以及利用率较低等缺点,但其具有线性收集特征、调蓄容量可扩展、兼顾污染物控制与雨水系统提标功能以及环境影响相对较小等特点,不失为一种解决当前我国城市雨水管理问题的较好技术选择。

② 由于埋设深、进水流量变化幅度大、明满流交替的运行方式以及现状浅层排水系统耦合联动等特点,多种因素叠加导致深层排水调蓄隧道系统在规划设计、结构与施工以及运行管理等方面面临诸多技术难题,需要进行深入研究、分析与论证,以确保实现工程建设目标,并充分发挥工程效益。

③ 建议从城市排水一体化的角度,将深层排水调蓄隧道与雨水排水系统提标、初期雨水污染控制、污水干管联通等统筹考虑,以提高深层排水调蓄隧道系统的利用率和技术经济性。

#### 参考文献:

[1] Scalise C, Fitzpatrick K. Chicago deep tunnel design and

construction[A]. Structures Congress[C]. USA:ASCE, 2012.

[2] Chen Huayong, Xu Weilin, Deng Jun, *et al.* Theoretical and experimental studies of hydraulic characteristics of discharge tunnel with vortex drop[J]. Journal of Hydrodynamics; Ser. B, 2010, 22(4): 582 - 589.

[3] 丁留谦,王虹,李娜,等. 美国城市雨污蓄滞深隧的历史沿革及其借鉴意义[J]. 中国给水排水, 2016, 32(10): 35 - 41.

Ding Liuqian, Wang Hong, Li Na, *et al.* Evolution of deep stormwater storage tunnel projects in the United States and its reference value to China [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(10): 35 - 41 (in Chinese).

[4] 沈庞勇. 关于建设城市雨水调蓄隧道几个问题的探讨[J]. 地下工程与隧道, 2015, (S): 27 - 28, 33.

Shen Pangyong. Discussion on several problems of urban stormwater deep storage drainage tunnel construction[J]. Underground Engineering and Tunnel, 2015, (S): 27 - 28, 33 (in Chinese).



作者简介:胡龙(1973 - ), 男, 四川邻水人, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为水污染控制、城市雨水管理。

E-mail: 13701940997@163.com

收稿日期:2017 - 10 - 31

绿水青山就是金山银山