

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.22.019

长距离大口径深层排水隧道的功能性试验方法

杜立刚¹, 石亚军¹, 饶世雄¹, 吴志高¹, 李 尔¹, 邹惠君¹,
张延军²

(1. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023; 2. 中建三局绿色产业
投资有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 长距离大口径深层排水隧道的功能性试验是其工程质量检验的重要环节,但现行规范规程中,缺少针对性的功能性试验方法。结合武汉市大东湖污水深隧工程实际情况,依据相关规范规程,通过理论分析,提出了内渗法+通水严密性试验的方法,作为长距离大口径深层排水隧道工程质量验收的依据。

关键词: 长距离; 大口径; 深层排水隧道; 功能性试验

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)22-0116-05

Functional Test Method for Long-distance and Large-diameter Deep Drainage Tunnel

DU Li-gang¹, SHI Ya-jun¹, RAO Shi-xiong¹, WU Zhi-gao¹, LI Er¹, ZOU Hui-jun¹,
ZHANG Yan-jun²

(1. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430023,
China; 2. China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan 430074,
China)

Abstract: Functional test of long-distance and large-diameter deep drainage tunnel is an important tache of its engineering quality inspection, but the specific methods of functional test in current codes and specifications lack pertinence. Combined with the actual situation of Dadonghu drainage deep tunnel project in Wuhan, the method of endosmosis and water tightness test is proposed as the basis for quality acceptance of long-distance and large-diameter deep drainage tunnel project through theoretical analysis, according to relevant codes and specifications.

Key words: long-distance; large-diameter; deep drainage tunnel; functional test

近年来,极端天气频发,城市内涝、溢流污染等事件频繁发生,城市排水系统能力不足和排水标准偏低等问题日益凸出,对城市原有排水系统的改造和完善刻不容缓。但受空间条件、施工影响等因素的限制,浅层管网改造难度大且效果不甚明显。为有效解决这一问题,我国多个城市^[1-3]正在采用深层排水隧道提升城市排水能力。深层排水隧道具有口径大、埋深大、检查井间距长的特点,而现行规范规

程中,缺少针对性的功能性试验方法。结合武汉市大东湖污水深隧工程实际情况,依据相关规范标准,参考国内相关工程案例,通过理论分析,提出了内渗法+通水严密性试验的方法,作为长距离大口径深层排水隧道工程质量验收的依据,可为类似工程提供参考。

1 工程概况

武汉市大东湖污水深隧工程是解决区域地块品

质需求与环保要求矛盾的深隧工程,于2017年动工兴建,2020年9月正式通水投入运行。该工程主要包含3座污水预处理站、17.6 km的主隧和1.7 km的支隧,工程总体布置见图1。其中,主隧直径 $D3\ 000\sim 3\ 400\text{ mm}$,埋深 $30\sim 42\text{ m}$,采用盾构法施工,设有6个施工竖井,分为5段,每段长度 $2.9\sim 4.3\text{ km}$ 。主隧采用叠合式双层衬砌结构,外衬为 25 cm 厚C50P12预制管片,内衬为 20 cm 厚C40P12现浇

混凝土,设计防水等级为三级防水,隧道内表面涂刷 1.5 mm 厚水泥基渗透结晶型防水涂料。深隧采用倒虹吸运行方式,设计工况下,主隧水位控制在绝对标高 $2.45\sim 12.00\text{ m}$ 。区域地下水中上层滞水主要赋存于填土层中,受大气降水、地表水下渗及人类生产生活用水等影响,无统一自由水面,勘察阶段实测区域上层滞水稳定水位在地面以下 $0.8\sim 7.5\text{ m}$,相当于绝对标高 $17.74\sim 33.17\text{ m}$ 。



图1 工程总体布置

Fig.1 General layout of the project

2 相关规范标准

根据《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)条文 2.0.1、2.0.2、9.1.1、9.1.9、9.2.1,压力管道是指工作压力大于或等于 0.1 MPa 的给排水管道,无压管道是指工作压力 $< 0.1\text{ MPa}$ 的给排水管道;给排水管道安装完成后应按要求进行管道功能试验,压力管道应按规范规定进行水压试验,无压管道应按规范规定进行严密性试验;水压试验可采用允许压力降或允许渗水量值作为试验合格的判定依据;压力管道水压试验的管段长度不宜大于 1.0 km ;无压力管道的闭水试验,条件允许时可一次试验不超过5个连续井段;对于无法分段试验的管道,应由工程有关方面根据工程具体情况确定;每个试验段两端需单独安装盲板封堵及后靠背等。

根据《盾构法隧道施工及验收规范》(GB 50446—2017)条文 16.0.1、16.0.2,结构表面应无贯穿性裂缝、无缺棱掉角,管片接缝应符合设计要求;隧道防水应符合设计要求,即盾构隧道根据设计确定的防水等级进行相应验收。

根据《地下工程防水技术规范》(GB 50108—2008)条文 3.2,按照工程的重要性和使用要求,地

下工程防水划分为4个等级,每个等级的防水标准应符合规范规定。

根据2021年12月发布的《城市深层排水隧道工程技术标准》(T/CMEA 23—2021)条文 8.10.14、8.10.15,深层排水隧道功能性验收应符合现行《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)的有关规定,且功能性试验前宜先完成隧道渗水观测监测,并达到地下结构三级防水标准。

《盾构法隧道施工及验收规范》(GB 50446—2017)、《地下工程防水技术规范》(GB 50108—2008)主要是对防水渗水有要求,有相应的验收标准,且较容易执行。

《城市深层排水隧道工程技术标准》(T/CMEA 23—2021)仅提出深层排水隧道功能性试验前宜进行相关观测及验收应满足的相关规定,并未针对深隧排水隧道的特点,提出相应的功能性试验方法。

《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)对给排水管道功能试验有明确规定及要求,但对长距离大口径深层排水隧道缺乏针对性,实际操作过程中很难执行。一是试验管段的长度很难满足规范要求;二是大口径深隧盲板及后靠背的安装、拆除及清理不易操作,且会对隧道主体结构产生影响;三是关于管道承受的压力,只考虑

了管道内部水压,没有考虑管道外部地下水压力和土压力的作用。

3 工程案例

目前国内外排水工程领域中,排水深隧工程均有应用案例^[4-5](见表1),其中,香港净化海港污水隧道工程为压力流运行,且采用了倒虹吸原理,与本工程类似,有一定的参考作用。香港净化海港污水隧道工程是目前全球最深的污水隧道以及亚洲最长的污水隧道,隧道深度在海平面以下70~160 m之间,采用压力流运行。一期工程长约24 km,二期工程长约21 km,全长约45 km,隧道直径1.2~3.5 m。该工程在建设过程中,对隧道浇筑混凝土衬砌前后的防水渗水进行了严格质量控制及检查,隧道建成后未进行水压试验和闭水试验。一期工程自2001年投入运营,至今保持正常运行。

表1 典型排水深隧工程案例

Tab.1 Typical cases of deep drainage tunnel

工程名称	工程规模	功能定位	运行方式
香港荃湾雨水排放隧道工程	$L=5.1\text{ km}$, $D=6.5\text{ m}$, 最大埋深200 m	雨洪排放	重力流
香港净化海港污水隧道工程	$L=45\text{ km}$, $D=1.2\sim 3.5\text{ m}$, 平均埋深100 m	污水输送	压力流
美国芝加哥深隧工程	$L=176\text{ km}$, $D=2.5\sim 10\text{ m}$, 埋深45~106 m	雨洪排放 兼顾雨水调蓄	重力流
新加坡污水深隧工程	$L=48\text{ km}$, $D=6\text{ m}$, 埋深22~55 m	污水输送	重力流
日本和田弥生干线深隧工程	$L=2.2\text{ km}$, $D=8.5\text{ m}$, 埋深50 m	雨水调蓄	重力流
马来西亚吉隆坡SMART隧道工程	$L=9.7\text{ km}$, $D=13.2\text{ m}$, 埋深23~33 m	雨洪排放 兼顾交通	重力流

4 功能性试验方法

4.1 理论分析

排水隧道是否发生渗漏,与隧道壁内、外两侧的水压差相关。排水隧道通水前,隧道仅受外侧地下水向内的外水压 P_1 作用;隧道通水运行时,隧道受外侧地下水向内的外水压 P_1 和隧道内向外的水压 P_2 双向作用。隧道承受水压示意图见图2。

若所有工况工作水压 P_2 均小于外水压 P_1 ,排水隧道运行时,隧道所受水压合力向内,则认为隧道空置时为最不利工况,在隧道结构及防水满足相关规范及设计要求的前提下,采用内渗法测定渗漏量来判断隧道施工质量是否合格的方法是合理的。

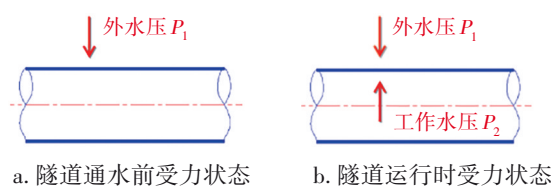


图2 隧道承受水压示意

Fig.2 Schematic diagram of tunnel bearing water pressure

若所有工况工作水压 P_2 均不小于外水压 P_1 ,排水隧道运行时,隧道所受水压合力存在向外的情况。根据《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)中对有压、无压管道的定义及其功能试验要求,若 $0 \leq P_2 - P_1 < 0.1\text{ MPa}$,即隧道所受水压合力虽向外,但符合规范中对无压管道内压的规定,则认为在隧道结构及防水满足设计要求及相关规范的前提下,应按规范规定进行严密性试验,隧道为不开槽施工,可采用内渗法测定渗漏量来判断隧道施工质量是否合格;若 $P_2 - P_1 \geq 0.1\text{ MPa}$,即隧道所受水压合力向外,且符合规范中对压力管道内压的规定,则认为在隧道结构及防水满足设计要求及相关规范的前提下,应按规范规定进行水压试验,判断隧道施工质量是否合格。

4.2 方法确定

根据本工程排水隧道近远期设计流量、埋深及控制水位等,可计算排水隧道正常工作水压,事故时最大水压可按最不利情况考虑,即排水隧道内部自由液位与周边水体水位一致,从而可确定工作水压 P_2 的范围。结合地勘资料及施工监测的地下水位,可推算隧道外水压 P_1 。

排水隧道各区段的工作水压 P_2 及外水压 P_1 如表2所示。由表2可知,排水隧道正常运行时,各区段工作水压 P_2 均小于外水压 P_1 ;排水深隧事故时,最不利情况下,虽存在部分区段工作水压 P_2 大于隧道外水压 P_1 ,但压差很小,小于0.1 MPa。本工程排水隧道在隧道结构防水满足设计要求及相关规范的前提下,可采用内渗法测定渗漏量来判断隧道施工质量是否合格。同时,鉴于本工程排水隧道为污水深层隧道且为单隧运行,一旦投入运行,很难停运检修,为防止隧道内污水外渗污染地下水,故在采用内渗法检测合格的基础上,增加严密性试验,确保隧道安全稳定运行。

鉴于本工程隧道分段的难度,拟采用整体通水严密性试验。

表2 各区段水压数据
Tab.2 Water pressure for each section

隧道区段	区段高程/m	外水压 P_1 /MPa	内水压(正常工作水压) P_2 /MPa	正常工作水压差 (P_2-P_1) /MPa	内水压(事故最大水压) P_2 /MPa	事故最大水压差 (P_2-P_1) /MPa
1#~2#	-8.85 ~ -11.20	0.30 ~ 0.35	0.21 ~ 0.23	-0.14 ~ -0.07	0.29 ~ 0.31	-0.06 ~ 0.01
2#~3#	-11.20 ~ -13.29	0.29 ~ 0.34	0.22 ~ 0.24	-0.12 ~ -0.05	0.31 ~ 0.33	-0.03 ~ 0.04
3#~4#	-13.29 ~ -16.21	0.28 ~ 0.33	0.23 ~ 0.26	-0.10 ~ -0.02	0.33 ~ 0.36	0 ~ 0.08
4#~5#	-16.21 ~ -18.29	0.31 ~ 0.41	0.23 ~ 0.28	-0.18 ~ -0.03	0.36 ~ 0.38	-0.05 ~ 0.07
5#~6#	-18.29 ~ -20.64	0.33 ~ 0.42	0.23 ~ 0.29	-0.19 ~ -0.04	0.38 ~ 0.41	-0.04 ~ 0.08

4.3 实施方法

内渗法检测规定详见《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)附录F,合格标准详见《地下工程防水技术规范》(GB 50108—2008)条文3.2和《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)条文9.3.7。

严密性试验采用闭水试验。本工程中排水隧

道涉及渗漏的部位有竖井、隧道主体和末端深隧泵站的进水闸阀,根据《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)、《给水排水构筑物工程施工及验收规范》(GB 50141—2008)及闸阀厂家提供的闸门允许渗漏量,计算各试验区段、竖井及闸门的允许渗漏量。

计算结果见表3。

表3 各部位的允许渗漏量
Tab.3 Permissible leakage of each section

隧道区段	隧道内径/mm	区段长度/km	各段允许渗漏量/ $(L \cdot \min^{-1} \cdot km^{-1})$	隧道主体允许渗漏量/ $(L \cdot \min^{-1})$	竖井允许渗漏量/ $(L \cdot \min^{-1})$	闸门允许渗漏量/ $(L \cdot \min^{-1})$
1#~2#	3 000	3.6	42.0	787.64	4.48	40×2(闸阀厂家提供,美国标准MSS SP-61)
2#~3#	3 000	3.2	42.0			
3#~4#	3 200	4.3	44.8			
4#~5#	3 400	2.9	47.6			
5#~6#	3 400	3.6	47.6			

根据《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)的相关规定,排水隧道严密性试

验步骤见表4。为便于观测,根据各井自由液面面积,将允许渗漏量转化成各井液面允许下降值。

表4 严密性试验步骤
Tab.4 Leak test procedure

项目	时间需求/h	试验内容
注水	48	缓慢注水至各功能井液面水位稳定在高程2.0 m,注水流量约1 m ³ /s
浸泡	72	
试验	2	隧道缓慢注水至各功能井液面水位稳定在高程14 m,注水流量约0.5 m ³ /s
观测	1	允许渗漏总量约52.13 m ³ ,各井液面允许均降0.16 m
	2	允许渗漏总量约104.27 m ³ ,各井液面允许均降0.32 m
	3	允许渗漏总量约156.40 m ³ ,各井液面允许均降0.48 m
	4	允许渗漏总量约208.53 m ³ ,各井液面允许均降0.64 m
排空	30	若渗漏量检测不合格,则需排空,查找渗漏点,进行修补

经计算,本工程排水隧道严密性试验需水量约17×10⁴ m³,水量较大,而排水隧道起端位于现状二郎庙污水厂内,故试验时就近取二郎庙污水厂尾水作为严密性试验的水源。

4.4 试验结果

经内渗法检测,隧道内壁没有线流、滴漏现象,

任意100 m²防水面积上的漏水和湿渍点数均小于7处,单个漏水点的最大漏水量均小于2.5 L/d,单个湿渍的最大面积不大于0.3 m²,隧道内渗水量<2 L/(m²·d),满足规范规定。

整体通水严密性试验过程中,隧道4 h内各井累积液面下降值均小于0.4 m,小于上述表4中允许

下降值0.64 m,表明渗漏水量小于规范规定。隧道经内渗法检测和整体通水严密性试验,内渗水量及整体通水严密性试验渗漏水量均小于相关规范规定,即认为本排水隧道工程质量满足验收要求。

5 结语

① 根据理论分析,并结合工程实际情况,本工程排水隧道采用内渗法+通水严密性试验的方法,符合现有相关规范规定及要求,方法合理,可操作性强。

② 国内现行的规范规程未能充分考虑深层排水隧道的特征,尚无针对性的功能性试验方法,为解决长距离大口径深层排水隧道功能性试验的法理依据,有必要启动对现行规范规程体系的完善工作。

参考文献:

- [1] 杜立刚,邹惠君,饶世雄,等. 武汉市大东湖核心区污水深隧传输系统工程设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(2):74-78.
DU Ligang, ZOU Huijun, RAO Shixiong, *et al.* Design of Dadonghu core area wastewater deep tunnel transmission system project in Wuhan[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(2): 74-78(in Chinese).
- [2] 高桢,宋嘉美,杨园晶,等. 深圳市前海—南山排水深隧系统工程方案研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13):96-100.
GAO Zhen, SONG Jiamei, YANG Yuanjing, *et al.*

Analysis of Qianhai-Nanshan deep tunnel drainage system project scheme in Shenzhen[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13):96-100(in Chinese).

- [3] 王晓鹏. 苏州河深隧调蓄工程综合设施的集约化布置方案[J]. 净水技术, 2019, 38(12):41-45.
WANG Xiaopeng. Solutions of integrated layout for comprehensive facilities in deep tunnel storage project under Suzhou Creek[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(12):41-45(in Chinese).
- [4] 王广华,陈彦,周建华,等. 深层排水隧道技术的应用与发展趋势研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(22):1-6,13.
WANG Guanghua, CHEN Yan, ZHOU Jianhua, *et al.* Discussion on application and development trend of deep tunnel drainage technology [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22):1-6,13(in Chinese).
- [5] 刘家宏,夏霖,王浩,等. 城市深隧排水系统典型案例分析[J]. 科学通报, 2017, 62(27):3269-3276.
LIU Jiahong, XIA Lin, WANG Hao, *et al.* Typical case analysis of deep tunnel drainage system in urban area [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(27): 3269-3276(in Chinese).

作者简介:杜立刚(1987-),男,湖北武汉人,硕士,高级工程师,主要从事排水防涝、水污染控制、海绵城市等水务项目研究及规划设计工作。

E-mail:ligang_du2010@sina.com

收稿日期:2022-09-14

修回日期:2022-10-19

(编辑:衣春敏)

像保护眼睛一样保护生态环境,
像对待生命一样对待生态环境