

大流量进水工况下主隧系统水气运动特性

王希晨¹, 张健², 许昕雨², 俞晓东², 陈胜²

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210019; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为给深层隧道排水系统工程的主隧系统结构设计和工况控制提供依据,采用数值模拟与物理模型试验相结合的方法,建立与物理模型体型结构相同,包含两竖井和相连主隧段的主隧系统三维数值模型,利用该数值模型对两种大流量极端工况下的进水过程进行三维动态数值模拟。结果表明:主隧系统在大流量下的进水过程可归纳为水流从两端竖井进入主隧,水流碰撞形成液面波并在主隧内相互碰撞叠加,主隧下游、上游侧端口先后被封堵,以及进流停止这4个阶段;进水流量主要影响主隧系统端口封堵程度、滞气现象和进水各阶段进程时间,流量越大,主隧端口的水流封堵、滞气现象越严重,进水过程各阶段进程时间也大幅缩短。

关键词:深层隧道排水系统;主隧系统;CFD 三维数值模拟;物理试验验证;水气两相流

中图分类号:TV672⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)05-0015-07

Characteristics of air-water movement in a main tunnel system under large inflow condition//WANG Xichen¹, ZHANG Jian², XU Tingyu², YU Xiaodong², CHEN Sheng² (1. Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project Jiangsu Water Source Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to provide scientific basis for the engineering structure design and working condition control for the main tunnel system of a deep tunnel drainage system, numerical simulation was carried out combined with physical model test. A three-dimensional numerical model of the main tunnel system including two shafts and a connected main tunnel section was established, which had the same body structure as the physical model. A three-dimensional dynamic simulation of the inflow process was performed under two extreme large inflow conditions. The results show that the water intake process of the main tunnel system under large flows can be summarized into 4 stages, flow entering into the main tunnel from two shafts, flow colliding to form surface waves which are transmitted and superimposed in the main tunnel, lower and upper side tunnel ports blocked successively, and inflow stopped. The inflow mainly affects the seal degree of the port in the main tunnel system, the phenomenon of hysteretic gas and the process time of each inflow stage. The seal degree of the port in the main tunnel system and the phenomenon of hysteretic gas is more serious under larger inflow condition, and the process time of each inflow stage is substantially reduced.

Key words: deep tunnel drainage system; main tunnel system; three-dimensional simulation of CFD; physical test and verification; air-water two-phase flow

为提高大型城市防洪排涝能力,针对中心城区地面硬化率高、建筑密度大、地下市政管线错综复杂等特点,美国芝加哥、日本东京、英国泰晤士、法国巴黎以及我国广州、上海、成都、重庆等城市已开始规划建设深层隧道排水调蓄系统工程(简称深隧工程)^[1-13]。主隧系统是整个深隧工程中的重要组成部分,由主隧及竖井组成,竖井与主隧水气相通,相互作用,竖井入流影响主隧流态,主隧排气影响竖井入流,主隧从明流到满流过程中易产生涌浪、滞留气团、弥合水锤等诸多复杂水力学现象。近年来,国内外学者对管(隧)道系统水气两相流进行了深入研究;Zhou等^[14]对有压输水管道中含有两个气团的瞬变压力进行了数值模拟研究;Trindade等^[15]通过数值模拟和模型试验对有压输水管道考虑空气增压的充水过程进行了研究;Catano-Lopera等^[16]采用数值模拟方法对芝加哥深隧系统工程中的瞬变流和水

气两相流进行了研究,提出不稳定工况和水气相互作用是间歇泉发生的重要原因;王才欢等^[17]通过某水利工程导流隧洞水力模型试验,指出在一定水流条件下,在较长的洞段及较大的流量区间,会出现明满交替流、明流冲击波、水流折冲等引发洞壁有害振动或空蚀破坏的不良流态;郭永鑫等^[18]结合南水北调中线工程北京西环暗涵充水试验,建立了长输水管道充水过程的水气两相流数值模型;吴建华等^[19]针对深隧工程中竖井的高落差和大流量等特点提出了一种大转角阶梯泄水道竖井结构,采用物理模型试验方法研究了流态、时均动水压力、消能和掺气特性等水力特性;王斌等^[20]通过物理模型试验分析了矩形截面折板竖井内的流态及消能特性,提出了改善竖井流态的整治措施;李璐等^[21]采用数值模型与物理模型相结合的方法对深隧工程的折板式竖井的消能特性进行了研究;夏海等^[22]对跌落式入流竖井内部流场进行了数值模拟,研究了不同竖井体型和不同入口流速工况下竖井内部压力场、速度场的变化规律及其消能率;徐剑乔^[23]采用数值模拟方法对武汉大东湖深隧工程入流竖井进行了建模分析,对比了涡流式竖井和折板式竖井在不同工况下的消能和排气效果;Wang 等^[24]针对深隧系统流量大范围变化工况,采用数值模型和物理模型相结合的手段,对某对称结构的新型折板式竖井的水力特性进行了研究。

综上所述,当前国内外学者对管(隧)道系统水气两相流研究主要集中在水利工程过水隧洞中的明满流水力特性方面,对于城市深隧工程的水气两相流研究大多集中在单体消能竖井等局部设施,对于大排水流量、深埋地下的深隧工程而言,其包含竖井和相连主隧的主隧系统的水力特性研究仍相当有限。目前,国内外对于管道中的明满流问题研究主要采取一维数值模拟方法^[25-29],该方法对主隧系统进水过程的模拟难以准确描述主隧系统水气两相流复杂的三元结构,以及主隧与竖井之间水气相互作用的具体流动现象。基于流体动力学计算(computational fluid dynamics, CFD)方法^[30]的三维数值模拟在形象地反映局部复杂流态方面有显著优势,目前已在深层隧道调蓄系统的消能竖井等局部流场的数值模拟中得到了应用^[21-24]。该方法对深隧全系统进行模拟,对于研究整个深隧系统水气运动特性具有重要意义,但三维 CFD 模拟消耗大量计算资源,现有硬件水平难以满足深隧全系统三维模拟需求。

为主隧调蓄过程中的水力学问题进行研究,笔者所在课题组搭建了包含两竖井及相连主隧的主隧系统物理模型。但受到试验条件、试验方法、量测

手段的限制,物理模型方法对于主隧系统全流场的水气运动现象捕捉有限。笔者采用 CFD 三维数值模拟与物理模型试验相结合的方式,建立包含两竖井和相连主隧段的主隧系统三维数值模型,对大流量工况下的进水过程进行三维动态数值模拟,旨在揭示主隧系统在大进水流量下的水气运动及压力变化规律,为主隧系统工程结构设计和工况控制提供科学依据。

1 模型建立与验证

1.1 数值模型的建立

建立深隧工程主隧系统三维数值模型,对其在大流量进水工况下的水气运动特性进行模拟,并通过笔者所在课题组搭建的深隧系统物理模型试验平台对模拟结果进行验证。数值模型与物理模型的体型结构尺寸相同,模型与原型比尺为 1 : 30。

模型包含两端竖井及一段与之相连的主隧,主隧管径 0.3 m,水平全长 51.79 m,坡度 0.001,两竖井间高差 0.051 79 m,主隧布置线路如图 1 所示。模型采用了如图 2 所示的简化竖井结构,竖井高 1 m,由中心内井及外井构成,内、外井直径分别为 0.4 m 和 1 m,内井底部连接一直径 0.4 m 的进水管,顶部开设一直径 0.1 m 的排气孔;内井壁面上、下端各开设 4 个使内外井相通的高 0.08 m、间距 0.1 m 方孔,水流由进水管进入内井后从下端方孔进入外井,外井气体从上端方孔进入内井后从竖井顶部排气孔排出。模型中对竖井采用内井底部进流的结构形式,模拟雨水跌落后经竖井内部消能工充分消能后,在竖井底部汇集并流入主隧的进流状态,旨在未确定竖井具体结构形式的情况下有效减小竖井水流对主隧排气作用的影响,获得较为良好的主隧进流条件。



图 1 主隧系统模型布置线路

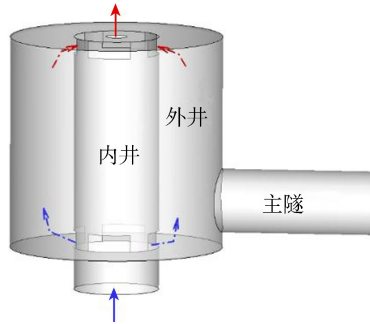


图 2 主隧系统三维数值模型概化竖井结构

对主隧系统三维数值模型进行计算网格划分:

竖井内井、外井主体部分和主隧段采取结构式网格,外井与主隧端口连接部分采取非结构式网格;对竖井下半部分和主隧两端进行网格加密。采用经网格无关性验证确定的单元格尺寸进行网格划分,总网格数约为 295.2 万个。

该主隧系统三维模型包含 2 个进口边界和 2 个出口边界,其中主隧两端竖井的进水口给定具有恒定流量的满管入流,竖井的排气口设为大气压边界,竖井内、外壁和主隧管壁均设为壁面边界,粗糙度忽略不计。考虑到模型两端竖井连通外界大气,进水过程为明流到明满流,无瞬变工况,且在水位高于管道端口上方 0.2 m 时就停止进流,滞留在管道内的气体压缩程度较小,将气体视为不可压缩气体且无温度变化。采用 VOF 方法(流体体积法)对水气两相交界面进行追踪,定义水为主相、气体为第二相,通过求解质量方程每一相的体积分数来对水气交界面进行模拟:体积分数为 1 则为水;体积分数为 0 则视作空气;体积分数为 0.5 视为水气交界面。由于模型体型复杂且存在弯曲流动,故选择对弯曲流动具有较高精度的 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型。基于 FLUENT 软件对主隧系统三维模型进行动态求解。由于模型网格数大,三维动态计算需要消耗大量计算资源及计算时间,选取两典型大流量极端工况进行模拟,计算时间步长设为 0.005 s,当竖井 1 水位超出主隧上表面约 0.2 m 时停止进流。工况 1 竖井 1 进水流量为 $0.0087 \text{ m}^3/\text{s}$,竖井 2 进水流量为 $0.0139 \text{ m}^3/\text{s}$ 。工况 2 两端竖井进水流量均为 $0.01623 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

1.2 物理模型试验验证

为实时监测主隧内水气两相流沿程压力变化过程,在主隧底部和顶部沿程布置了一系列测压点:从竖井一侧主隧端口开始,于主隧内靠近底部位置沿管线方向每隔 10 m 布置 1 个测压点(记作 P1 ~ P6),其中 P1 点位于距主隧端口界面 0.1 m 处。此外,在 P1 测压点对应的管顶位置布置 P7 测压点,在靠近竖井外壁、主隧端口界面顶部向上 0.1 m 处布置 P8 测压点,在侧压点上布置压力传感器,进行同步采集压力数据,见图 3。主隧系统三维数值模型与物理模型相同位置布置 8 个测压点,计算过程中进行实时监测压力,每 0.05 s 提取 1 个压力值,得到压力随时间变化的曲线。

将主隧系统在工况 1 下的三维数值模拟与物理模型试验结果进行比对,对主隧系统三维数值模型的可靠性进行验证。工况 1 进水条件下,物理模型试验观测和三维数值模拟的进水过程基本相似,主隧系统三维数值模拟及物理模型试验部分测压点上压力随时间变化曲线如图 4 所示。三维数值计算结

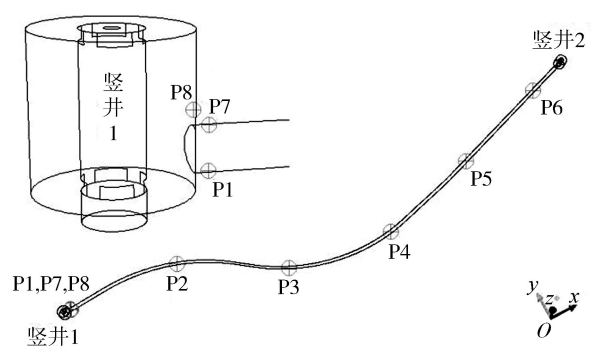


图 3 主隧系统三维模型测压点布置

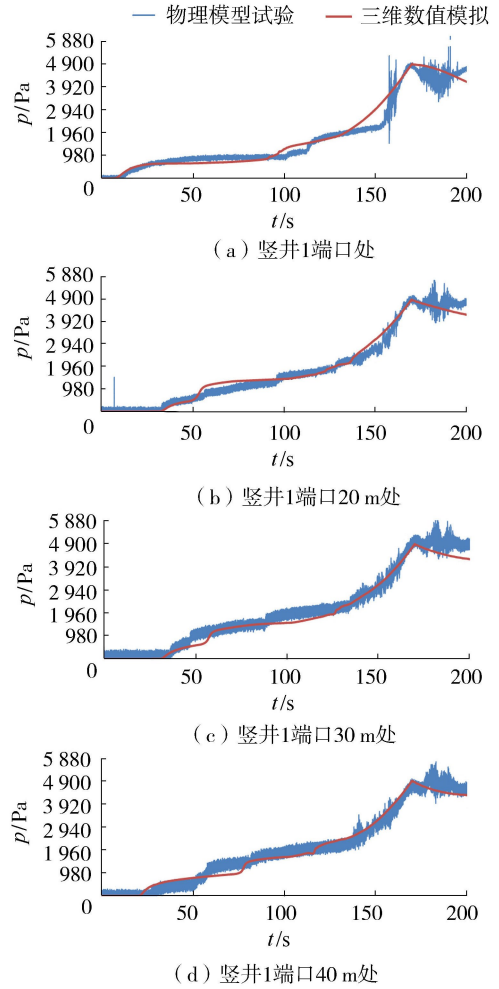


图 4 工况 1 主隧系统三维数值模拟与物理模型试验部分测压点压力变化对比

果与物理试验测量值与在压力变化趋势和压力值上均较为接近,仅在曲线糙率、压力变化时间点等处存在微小误差。造成误差的原因可能包括:三维数值模型由算法、网格质量产生的计算误差;数值模拟与物理模型在入流工况控制上产生的误差;物理模型对压力数据量测和采集精度产生的误差;将气体视为不可压缩气体带来的误差。三维数值模型结果与试验量测的压力曲线变化趋势上基本接近且误差在合理范围内,因此建立的主隧系统三维数值模型是可靠的,可用于研究主隧系统在大进水流量工况下

2 水力特性分析

在前述模型建立的基础上,对主隧系统两种工况下的动态模拟结果进行分析,对进水过程、水气运动及压力变化过程进行分析总结。

2.1 进水过程

通过计算对比分析可知,工况 1 和工况 2 入流条件下主隧系统进水过程相似,可归纳为 4 个阶段:
①第一阶段:水流由两端竖井开始进入主隧。②第二阶段:两端入流在主隧中部附近冲撞产生一对反射液面波,沿主隧中部向两端推进过程中又产生较弱液面波,多股液面波相互碰撞、叠加,主隧水位迅速上升。③第三阶段:主隧下游、上游侧端口先后被水流封堵,主隧进流受阻,两端竖井水位超过主隧顶部并持续上升,大量气体滞留于主隧上部,仅少量气体从两端口顶部排出。④第四阶段:当上游竖井水位超出主隧顶部并继续上涨时对进流进行控制;进流停止后,主隧内气体逐渐排出,两端竖井水位逐步回落。

2.2 水气运动特性

分别截取两端竖井包括相连主隧局部段沿主隧入流方向截取的中心平面以及端口附近主隧横截面,对各截面上进行压力、速度矢量和水面线流场综合分析,见图 5~8,进水过程的 4 个阶段水气运动特性总结如下。

a. 第一阶段:水流进入主隧初期,流场整体压力和速度分布相对均匀,两竖井排气口速度相近,主隧两端口处速度场均存在微弱扰动——水流从主隧下部进入,气体从主隧上部排出。工况 1 中,竖井 2 一侧主隧端口水位略高于竖井 1 一侧主隧端口水位,而工况 2 由于两端进水流量相同,主隧两侧端口水位差异并不明显。

b. 第二阶段:当两股水流在主隧中部碰撞并产生第一对反射波时,反射波向主隧两端推进,使得主

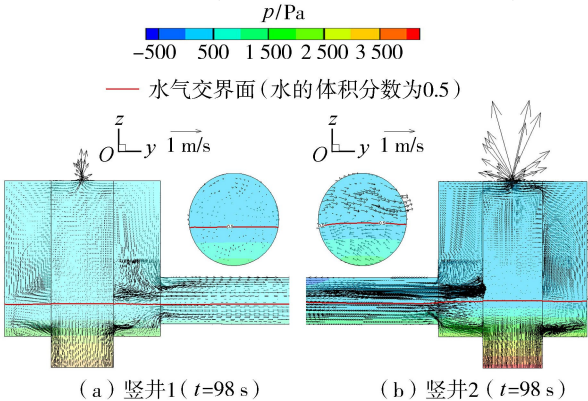


图 5 进水第二阶段工况 1 水气运动特性

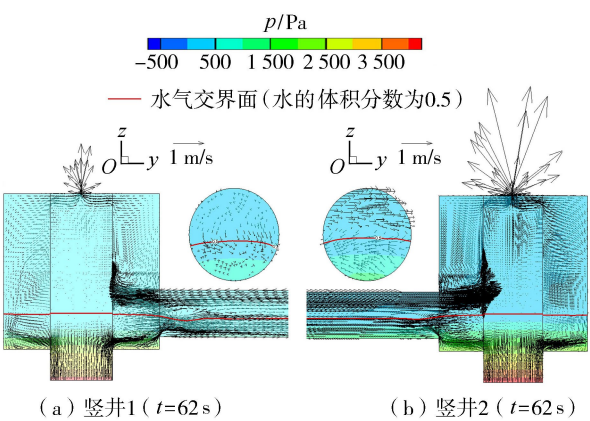


图 6 进水第二阶段工况 2 水气运动特性

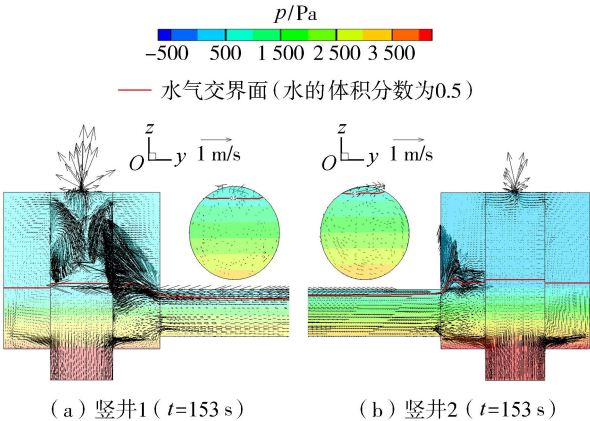


图 7 进水第三阶段工况 1 水气运动特性

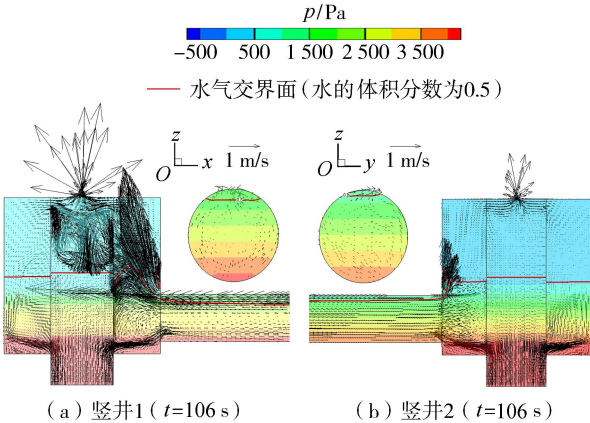


图 8 进水第三阶段工况 2 水气运动特性

隧端口上部气流排气速度增大,气体冲击两端竖井内壁。该阶段两种工况水气运动特征略有差异,工况 2 较工况 1 水气扰动更为剧烈。

工况 1:随着主隧水位上升,竖井 2 侧主隧端口排气面积减小且低于竖井 1 侧排气面积,因而该侧主隧上部排出气流速度增大,并进一步影响到两竖井顶部排气口速度,使得竖井 1 排气口速度明显减小,竖井 2 排气口速度显著增大。当第一股反射波逼近竖井 2 时,主隧上部气流对竖井内壁冲击速度增大,冲击面积减小,主隧上部出现局部低压,竖井 2 顶部排气速度达到最大;而竖井 1 端口处主隧上

部气流速度减小,竖井 1 顶部排气口排气进一步减弱。当竖井 2 端口处产生反向液面波并向主隧内部传递时,主隧内上部气流速度迅速降低,而主隧端口排气方向开始朝上变化,与内壁间存在一局部气团;同时竖井 2 顶部排气速度开始减小,而竖井 1 顶部排气速度开始增加。

工况 2:受到坡度影响,液面波向竖井 2 侧传递较快,因而主隧上部气流从竖井 2 侧快速排出,竖井 2 顶部排气速度增大。当第一股反射波逼近竖井 2 时,主隧端口排出气流对外井产生涡旋扰动。液面波抵达竖井 2,对内井壁面产生强烈冲击,外井及主隧端口水位大幅上升,排气面积减小,竖井 2 顶部排气减弱,竖井 1 顶部排气加大。

c. 第三阶段:竖井 2 处主隧端口被封堵,少量气流从端口顶部小区域并贴向竖井外井壁向上排出,竖井 2 外井水气作用明显,水面受到气流扰动出现局部壅高,竖井 2 顶部排气明显减小;主隧内气流向竖井 2 侧排气受阻,开始大量排向竖井 1 一侧,竖井 1 侧主隧端口排气速度剧烈增加,对竖井 1 内井壁形成强烈冲击,竖井 1 顶部排气速度也显著增大。竖井 1 处主隧端口很快也被水流封堵,竖井 1 顶端排气开始减小,对内井上部气流造成强烈扰动并产生气旋;竖井 2 处排气开始增加。两端竖井水位开始超过主隧顶部并持续上升,两端主隧端口气流向上排出水面,水面受扰动均产生局部壅高,两端竖井顶部排气开始趋于接近。竖井 1 水位超过主隧顶部约 0.2 m,此时主隧内部压力明显增加,内井均存在不同程度的气旋扰动,由于主隧存在一定坡度,竖井 2 侧主隧端口排出的气流方向较竖井 1 更贴向竖井外井壁面。

d. 第四阶段:停止进流,两竖井顶部几乎停止向外排气,主隧内气体持续从两侧主隧端口进入两竖井内部,竖井水位逐渐回落,主隧压力降低。由于坡降因素,竖井 1 较竖井 2 水位降低较快,压力分布也较低。

综上可知:主隧系统两种工况下进水过程各阶段水气运动特性相似,但由于工况 2 较工况 1 进流量大,其气体扰动、排气速度均较工况 1 种更为剧烈。两种极端工况下,主隧气流从两主隧端口排出时,会对竖井内井壁产生冲击,易产生空蚀;主隧端口处水气扰动明显,当下游侧和上游侧主隧端口先后被水流封堵时,两端排气变化剧烈。主隧端口被水流封堵后,气体难以顺畅排出且进流受阻,大量气体滞留在主隧顶部,使得主隧的蓄水能力大大减弱。进流较大的工况下主隧端口更易被封堵,滞气现象更为严重。

2.3 压力变化过程

两种工况下,进水过程 4 个阶段主隧沿程压力随时间变化趋势相似,见图 9、图 10,其压力变化过程如下。

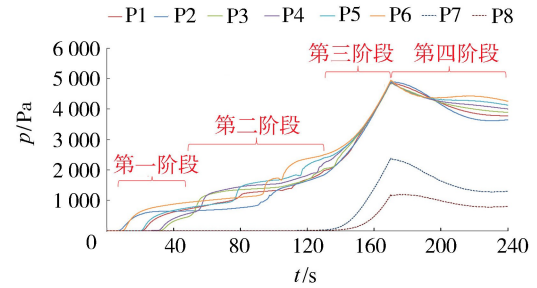


图 9 工况 1 主隧系统三维数值模型测压点压力变化

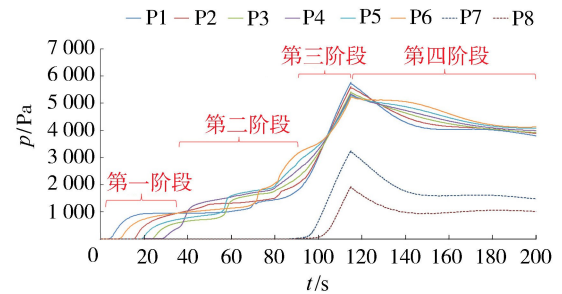


图 10 工况 2 主隧系统三维数值模型测压点压力变化

a. 第一阶段(工况 1,0~45 s;工况 2,0~35 s):水流从两端口进入主隧,主隧压力平稳上升。

b. 第二阶段(工况 1,45~130 s;工况 2,35~90 s):水流在主隧中部汇集碰撞形成液面波,多股液面波沿主隧在两竖井间碰撞、叠加,主隧沿程各压力随液面波的经过出现跳跃式上升。

c. 第三阶段(工况 1,130~170 s;工况 2,90~115 s):水流开始封堵主隧端口,主隧进流受阻,各压力曲线出现大幅上升,主隧沿程各测压点压力值趋于接近;随着竖井水位超出主隧顶部持续上升,竖井两测压点(P7、P8)压力也开始大幅增加。

d. 第四阶段(工况 1,170~240 s;工况 2,115~200 s):进流停止,竖井水位回落,压力缓慢降低。各压力曲线下落过程中存在小波动,竖井水面回落过程中出现小幅震荡,影响到主隧内部进水排气,进而对主隧沿程压力产生波动影响。当竖井水位超过主隧上升阶段,主隧压力迅速上升,但因对进流进行了有效控制,整个充水过程中各测压点最大压力值均未超过 5 kPa(相当于原型的 176 kPa)。

3 结 论

a. 主隧系统在大流量下的进水过程可归纳为 4 个阶段:第一阶段——水流由两端竖井开始进入主隧;第二阶段——两端进流在主隧中部附近碰撞产生一对反射液面波,沿主隧向两端推进过程中,多

股液面波相互碰撞叠加,主隧水位迅速上升;第三阶段——主隧下游、上游端口先后被水流封堵,两端竖井水位超过主隧顶高并持续上升,大量气体滞留于主隧上部,仅少量气体从两侧主隧端口顶部排出;第阶段四段——停止进流,竖井水位波动式逐渐回落。

b. 进水流量主要影响主隧系统端口封堵程度、滞气现象和进水各阶段进程时间。流量越大,主隧端口的水流封堵、滞气现象越严重,进水过程各阶段进程时间大幅缩短,主隧端口气体扰动也更为剧烈。

c. 依据两种大流量工况下主隧系统进水过程水气运动特性分析,可对主隧系统优化设计提出以下建议:①优化竖井消能结构以减小主隧进流的掺气量,增强进流的平稳性,提高竖井排气性;②加固竖井内井下部壁面,以增强结构稳定性,提升抗空蚀、抗冲击能力;③改善主隧与竖井的衔接结构,以增强主隧端口过流排气能力,减少进水对主隧端口的局部封堵,减小主隧内部滞气;④对进水流量进行有效控制,减缓进水流量,减短峰值流量进流时间,当水位高于主隧顶部时停止进流。

d. 笔者针对主隧系统物理模型建立三维数学模型并开展 CFD 模拟研究,揭示了主隧系统在大流量进水工况下水气运动及压力变化规律。但主隧系统三维数值模型采用了简化竖井结构方案,入流条件较为理想化。而实际工程中,经竖井消能传输后,进入主隧两端的水流掺气量和能量较大,主隧端口处的扰动也会更加严重,对入流和排气均会造成阻碍,特别是大流量下主隧内滞气现象会严重影响系统结构安全。因此,主隧系统三维数值模型主隧两端入流竖井应依据工程明确的竖井具体设计方案进行建立,以模拟真实入流情况下主隧系统入流过程,为实际工程设计提供具体优化方案。

参考文献:

[1] 蒋佳鑫,李毅,柏小家,等. 城市内涝成因及防治对策[J]. 工业用水与废水, 2015 (5): 13-17. (JIANG Jiaxin, LI Yi, BO Xiaojia, et al. Causes and countermeasures of urban waterlogging [J]. Industrial Water and Wastewater, 2015(5):13-17. (in Chinese))

[2] 冯鈞,王云峰,邬炜,等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48 (6): 479-487. (FENG Jun, WANG Yunfeng, WU Wei, et al. Construction method and application of event logic graph for urban waterlogging [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (6): 479-487. (in Chinese))

[3] 陆海明,邹鹰,孙金华,等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护, 2020, 36 (1): 58-65. (LU Haiming, ZOU Yin, SUN Jinhua, et al.

Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (1): 58-65. (in Chinese))

[4] REINA P. London starts plan to fix its plumbing [J]. ENR: Engineering News-Record, 2011, 266 (15): 18-19.

[5] 门绚,李冬,张杰. 国内外深隧排水系统建设状况及其启示[J]. 河北工业科技, 2015, 32 (5): 438-442. (MEN Xuan, LI Dong, ZHANG Jie. Construction status and inspirations of deep tunnel drainage system both at home and abroad [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2015, 32 (5): 438-442. (in Chinese))

[6] 叶永祥,简汉成,张柏坚. 防洪与保育水资源并重的水塘间雨水转运计划[J]. 城镇供水, 2011 (增刊 1): 178-182. (YE Yongxiang, JIAN Hancheng, ZHANG Baijian. Inter-reservoir transfer scheme-a project serving dual flood prevention and water conversation objectives [J]. City and Town Water Supply, 2011 (Sup1): 178-182. (in Chinese))

[7] 王广华,李文涛,陈貽龙,等. 广州市东濠涌深层排水隧道工程前期研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32 (22): 7-13. (WANG Guanghua, LI Wentao, CHEN Yilong, et al. Preliminary study on deep tunnel drainage engineering at Donghao Creek in Guangzhou [J]. China Water and Wastewater, 2016, 32 (22): 7-13. (in Chinese))

[8] 王碧波,李怀正,沈庞勇,等. 应用 InfoWorks 模型对深隧入流点设置方案的优化[J]. 净水技术, 2018, 37 (7): 97-102. (WANG Bibo, LI Huaizheng, SHEN Pangyong, et al. Optimization of inflow points of deep tunnel intercepting wells by using InfoWorks model [J]. Water Purification Technology, 2018, 37 (7): 97-102. (in Chinese))

[9] 王晓鹏. 深层排水调蓄隧道系统集成化布置关键技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2020, 257 (9): 15-16. (WANG Xiaopeng. Research on key technology of intensive layout of deep drainage Storage Tunnel System [J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2020, 257 (9): 15-16. (in Chinese))

[10] 李莉,陆柯. 成都市中心城区深层隧道排水系统规划研究[J]. 城市道桥与防洪, 2017 (6): 146-149, 201. (LI Li, LU Ke. Planning study of deep tunnel drainage system in central area of chengdu [J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2017 (6): 146-149, 201. (in Chinese))

[11] 刘婷. 重庆主城区地下空间利用之深层排水隧道规划探讨[J]. 重庆建筑, 2019 (1): 25-27. (LIU Ting. On deep drainage tunnel planning for underground space utilization in the Main Urban Districts of Chongqing [J]. Chongqing Architecture, 2019 (1): 25-27. (in Chinese))

[12] LIU J H, XIA L, WANG H, et al. Typical case analysis of deep tunnel drainage system in urban area [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62 (27): 3269-3276.

[13] 胡龙,戴晓虎,唐建国. 深层排水调蓄隧道系统关键技术问题分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34 (8): 17-

21. (HU Long, DAI Xiaohu, TANG Jianguo. Analysis of key technical problems of deep drainage tunnel system [J]. China Water and Wastewater, 2018,34(8):17-21. (in Chinese))
- [14] ZHOU L, LIU D, KARNEY B. Investigation of hydraulic transients of two entrapped air pockets in a water pipeline [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(9): 949-959.
- [15] TRINDADE B C, VASCONCELOS J G. Modeling of water pipeline filling events accounting for air phase interactions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(9): 921-934.
- [16] CATANO-LOPERA Y A, TOKYAY T E, MARTIN J E, et al. Modeling of a transient event in the tunnel and reservoir plan system in Chicago, Illinois[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(9): 1-12.
- [17] 王才欢, 杜兰, 王兵, 等. 多用途水工隧洞水力特性及运行方式研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(12): 59-64. (WANG Caihuan, DU Lan, WANG Bing, et al. Hydraulic characteristics and operation mode of multipurpose hydraulic tunnel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(12): 59-64. (in Chinese))
- [18] 郭永鑫, 杨开林, 郭新蕾, 等. 长输水管道充水的气液两相流数值模拟[J]. 水利水电技术, 2016, 47(9): 61-64. (GUO Yongxin, YANG Kailin, Guo Xinlei, et al. Numerical simulation on air-liquid two-phase flow for water filling of long distance water conveyance pipeline [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(9): 61-64. (in Chinese))
- [19] 吴建华, 杨涛, 沈洁艺, 等. 大旋转角阶梯泄水道竖井水力特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2018, 33(2): 38-42. (WU Jianhua, YANG Tao, SHENG Jieyi, et al. Hydraulic characteristics of stepped spillway dropshafts with large angle [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(2): 38-42. (in Chinese))
- [20] 王斌, 陈良, 冯爽, 等. 深层隧道排水系统中矩形折板竖井水力特性试验研究[J]. 人民长江, 2020, 51(7): 168-173. (WANG Bin, CHEN Liang, FENG Shuang, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of rectangular baffle drop shaft in deep tunnel drainage system [J]. Yangtze River, 2020, 51(7): 168-173. (in Chinese))
- [21] 李璐, 梁舒豪, 杨墨, 等. 用于深隧工程的折板式竖井湿室部分数值模拟研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(13): 128-133. (LI Lu, LIANG Shuhao, YANG Mo, et al. Numerical simulation of wet chamber part of a baffle-drop shaft in deep tunnel engineering [J]. China Water and Wastewater, 2019, 35(13): 128-133. (in Chinese))
- [22] 夏海, 王红武, 胡龙. 深隧调蓄系统中入流竖井内部流场的数值模拟[J]. 中国给水排水, 2019, 35(1): 123-126. (XIA Hai, WANG Hongwu, HU Long. Numerical simulation of internal flow field of inflow shaft in deep stormwater storage tunnel system [J]. China Water and Wastewater, 2019, 35(1): 123-126. (in Chinese))
- [23] 徐剑乔. 基于 FLUENT 的排水深隧入流竖井三维湍流仿真[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21): 133-139. (XU Jianqiao. Three-dimensional turbulent simulation of inflow shaft in deep tunnel based on FLUENT [J]. China Water and Wastewater, 2019, 35(21): 133-139. (in Chinese))
- [24] WANG X C, ZHANG J, FU Z F, et al. Influences of flow rate and baffle spacing on hydraulic characteristics of a novel baffle dropshaft [J]. Water Science and Engineering, 2020, 13(3): 233-242.
- [25] SONG C C S, CARDIE J A, LEUNG K S. Transient mixed-flow models for storm sewers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(11): 1487-1504.
- [26] 李赟杰, 周领, 欧传奇, 等. 考虑动态摩阻的管道泄漏水力瞬变数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 62-68. (LI Yunjie, ZHOU Ling, OU Chuanqi, et al. Numerical simulation of hydraulic transient in a leakage pipe considering unsteady friction [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 62-68. (in Chinese))
- [27] 李辉, 陈乃祥, 樊红刚, 等. 具有明满交替流动的三峡右岸地下电站的动态仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(11): 29-31. (LI Hui, CHEN Naixiang, FAN Honggang, et al. Transient simulation with MFSPF for right bank underground hydropower station of the Three Gorges [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(11): 29-31. (in Chinese))
- [28] 于永海, 俞国青. 用水气两相流数学模型计算明流长隧洞通气量[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(4): 36-39. (YU Yonghai, YU Guoqing. Study of air demands of long tunnels based on air-water two-phase flow model [J]. Journal of Hohai University (Science and Technology), 2000, 28(4): 36-39. (in Chinese))
- [29] 杨开林. 明渠结合有压管调水系统的水力瞬变计算[J]. 水利水电技术, 2002, 33(4): 5-7. (YANG Kailin. Simulation of hydraulic transients in water diversion projects with open channels and pressurized pipelines [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(4): 5-7. (in Chinese))
- [30] 朱亮, 汪跃, 陈琳, 等. 基于 CFD 仿真模拟及 PIV 粒子示踪相结合法超滤膜组件优化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 402-410. (ZHU Liang, WANG Yue, CHEN Lin, et al. Optimization of the ultrafiltration (UF) components based on combined method of CFD and PIV particle tracing method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 402-410. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-10-15 编辑: 骆超)