

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.15.018

基于瞬变流模型的深层排水隧道浪涌风险分析

赵吉¹, 郭佳², 苏德慧²

(1. 新地中联工程设计有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 新地环境科技<深圳>有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 基于对深层排水隧道内浪涌成因及其危害的分析,总结出量化模拟浪涌过程的瞬变流模型所需的必要条件:①可全解一维圣维南方程;②可模拟明满流交替情况;③管道可被切分为若干管节;④模拟步长足够短。对比分析了几种水力模型(InfoWorks ICM、Mike Urban、SWMM5、ITM、TAP)在量化分析瞬变流时的可行性和可操作性,并采用 TAP 模型模拟某深隧系统在快速填充工况下浪涌的形成过程。结果表明,水流遭遇过程型障碍物和隔断型障碍物时,均会因形成受困气穴而产生不同程度的负压。量化分析结果可为隧道衬砌设计提供参考,以预防负压造成的结构性破坏。

关键词: 深层排水隧道; 浪涌; 瞬变流; 水力模型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)15-0110-05

Surge Risk Analysis of Deep Drainage Tunnel System Based on Transient Flow Model

ZHAO Ji¹, GUO Jia², SU De-hui²

(1. NewGround China Union Engineering Design Co. Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. NewGround Environmental Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Based on analyzing the causes and hazards of surge formation in deep drainage tunnels, the necessary requirements for modeling surge phenomenon were summarized as follows: complete solution of one-dimensional St. Venant equation, being capable of modeling both free flow and pressurized flow, pipes being divided into segments, and short enough modeling step. Feasibility and operability of several hydraulic models (InfoWorks ICM, Mike Urban, SWMM5, ITM and TAP) in quantitative analysis of transient flow were compared and analyzed, and the TAP model was employed to simulate the surge formation process in a deep drainage tunnel system under the condition of rapid filling. Different degrees of negative pressure would be generated due to trapped air pocket when the flow encountered way-along obstacles and separate obstacles. The quantitative analysis results could provide reference for the design of tunnel inner lining to prevent structural damage caused by negative pressure.

Key words: deep drainage tunnel; surge; transient flow; hydraulic model

用于合流制溢流污水调蓄和雨水转输的深层排水隧道(以下简称“深隧”)系统,作为一种缓解城市溢流污染和内涝的方式,自 20 世纪 50 年代在北美应用以来,全球多个城市已有实践。这种类型的深隧系统兼具调蓄和排涝功能,当系统遭遇短时强

降雨时,隧道由空置状态转为快速入流填充状态,隧道内的水力流态由明流向满流快速转换或明满流交替运行,在此过程中可能产生浪涌,其成因主要体现在两个方面:①高速水流遭遇障碍物而引起的浪涌。深隧处于快速填充状态时,当从隧道下游向上游运

动的高速水流遭遇障碍物时会产生能量波动而形成浪涌。②受困气穴被挤压而引起的浪涌。随着隧道被充满并完全进入有压流状态时,受困气穴逐渐受压成为高压气囊,其被挤压消失时在隧道内部形成负压存在破坏隧道衬砌的风险,或当高压气囊逐渐移动至可能的逸出点时(如跌水竖井),因其能量集中释放产生的气爆水柱会影响浅层系统的运行,甚至会破坏地表构筑物。美国芝加哥隧道和明尼阿波利斯隧道^[1]就曾因高压受困气穴释放导致气爆水柱发生过事故,造成了人员受伤和财产损失。因此,在规划设计阶段需对深隧系统运行时可能发生的浪涌风险进行量化分析,以便采取必要措施缓解或规避风险。

本研究以某深隧系统为案例,基于TAP模型分析快速填充工况下浪涌在深隧中的形成过程,并对浪涌风险进行量化分析。

1 项目概况

南方某城市为缓解合流制溢流污染以及区域内涝问题,经综合评估论证,拟采用深层排水隧道系统收集调蓄合流制溢流污水及初期雨水,并在强降雨时以深隧及其末端泵站为雨水转输通道,与浅层排涝系统协同提升区域排涝能力。图1为深隧系统平面布置,该深隧内径为4 m,全长为6.2 km,隧道埋深为21~28 m,隧道坡度为0.1%。

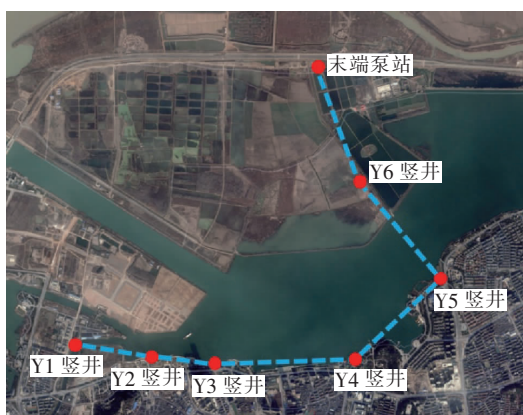


图1 南方某城市的深隧系统平面布置

Fig.1 Layout of deep tunnel system in a southern city

由于深隧系统设计最大排涝规模为 $30 \text{ m}^3/\text{s}$,因此当深隧系统处于排涝工况时,浅层系统会启动限流措施,保证排涝工况下各竖井最大入流量总和不超过深隧系统的最大排涝规模。50年一遇降雨条件下各入流竖井流量过程线见图2。

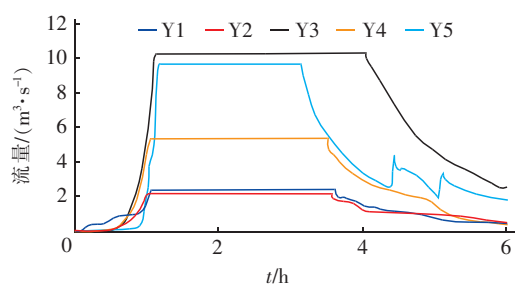


图2 深隧系统各跌水竖井流量过程线

Fig.2 Hydrograph of each drop shaft in deep tunnel system

末端泵站设计运行工况如下:

① 初雨处理工况:设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,由2台提升泵组成,启泵液位为 -18.70 m ,停泵液位为 -7.00 m 。

② 排涝工况:设计规模为 $30 \text{ m}^3/\text{s}$,由8台排涝泵组成,启泵液位依次为 -7.00 、 -5.50 、 -4.75 、 -4.00 、 -3.25 、 -2.50 、 -1.75 、 -1.00 m 。

③ 排空工况:待泵池内水位下降至 -18.70 m 时,通过开启处理泵进行排空。

2 模型选择

由浪涌成因可知,浪涌现象在瞬时发生,采用数学模型预测和分析浪涌现象需具备以下条件:

① 在非恒定流的条件下可以全解一维圣维南方程^[2]。

连续方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

式中: A 为过水断面面积, m^2 ; Q 为流量, m^3/s ; t 为时间, s ; H 为水头, m ; x 为距离, m ; S_f 为摩阻比降; g 为重力加速度, m/s^2 。

② 可模拟明满流交替情况。

③ 较长管道可被切分为若干管节,以进行更小尺度的细节水力计算。

④ 模拟步长应足够短(1 s以下),以模拟瞬时水力流态变化。

2.1 综合性水文水力模型

美国环保署开发的SWMM5水文水力模型虽可全解一维圣维南方程,并允许用户自定义最小模拟步长,但由于其在求解动量方程时采用整段管道的管长作为惯性项和压力项的分母^[2],导致其无法细

分管道形成若干管节进行水力计算,无法准确模拟浪涌过程。但因其具备可以定义最小模拟步长的优势,可以采用人为将管道分为若干管节的方式(各管节需采用节点连接)模拟浪涌过程^[3],但人为分解过程非常耗时且繁杂。

InfoWorks ICM 和 Mike Urban 作为综合性城市水文水力模型,在以隐式有限差分法求解一维圣维南方程时保留惯性项和压力项中的 ∂x ,为细分管道提供了条件,但由于这两种模型所能设定的最小模拟步长为 1 s,其仅可以模拟浪涌的趋势,却无法准确量化浪涌程度^[4]。

2.2 瞬变水力模型

目前已被应用的专业浪涌分析模型(即瞬变水力模型)有 ITM(Illinois Transient Model)和 TAP(Transient Analysis Program)。ITM 操作界面虽以 SWMM 为基础进行开发,但其求解质量和动量守恒方程的方法与 SWMM 有本质区别。对于明渠流,ITM 采用有限体积法而非有限差分法求解一维圣维南方程;对于压力流,ITM 采用将圣维南方程和可压缩水锤方程联立的方法求解质量和动量守恒方程^[4]。这一求解方式的改变使得 ITM 可以允许用户将各管道自行切分至所需的管节数以进行细化模拟。ITM 不仅沿用了 SWMM 可自定义最小模拟步

长的做法,还允许用户根据需要输出小于 1 s 步长的结果文件。ITM 对于浪涌模拟结果的可靠性也通过在多种工况下的物理模型试验进行了验证^[4]。但是,ITM 现有版本还无法直接添加水泵启停运行规则,而只能通过间接的使用流量特性曲线定义水泵运行情况,使其在模拟系统性工程项目时可操作性较差。

TAP 采用有限体积法全解一维圣维南方程,并引入 Preissmann 狭槽模拟压力流。与 ICM 和 Mike Urban 相比,TAP 的优势在于其模拟步长在 1 s 以下,并且在模拟过程中,会在保证结果收敛的基础上自动计算各管节模拟所需的最小模拟步长并取该最小步长进行模拟;相比 SWMM5,TAP 的优势在于其可以将实际管道切分为若干管节进行模拟。这两点优势使得精细化分析浪涌形成过程并在此基础上量化浪涌程度成为可能。此外,TAP 还具备以下特点:①用户可以自定义 Preissmann 狭槽宽度,以根据需要减少因引入 Preissmann 狭槽而导致的系统总调蓄容积增加的影响;②可定义闸门、堰和水泵等系统关键节点特征;③允许用户根据需要自定义输出结果的步长;④可根据其输出结果计算系统排气量。

表 1 对比分析了几种水力模型模拟瞬变流的特征要素。

表 1 不同水力模型模拟瞬变流的特征要素分析

Tab. 1 Analysis on the key features for transient flow simulation of different hydraulic models

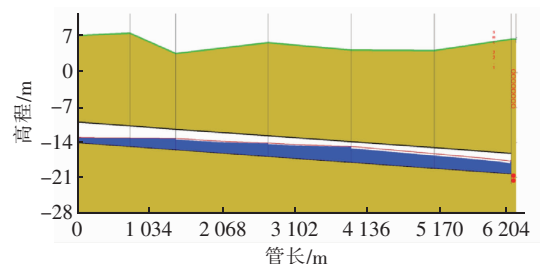
水力模型	是否全解 1DSV 方程	1DSV 方程求解方法	压力流模拟方法	是否可切分管道	最小模拟步长	最小输出步长
TAP	是	显式有限体积法	Preissmann 狭槽	自动	自动调整,但最大不超过 1 s	可自定义
SWMM5	是	隐式有限差分法	EXTRAN node-link approach	否	可自定义	1 s
ITM	是	显式有限体积法	可压缩水锤方程	可自定义	可自定义	可自定义
InfoWorks ICM	是	隐式有限差分法	Preissmann 狭槽	可自定义	1 s	1 s
Mike Urban	是	隐式有限差分法	Preissmann 狭槽	可自定义	1 s	1 s

3 模拟分析

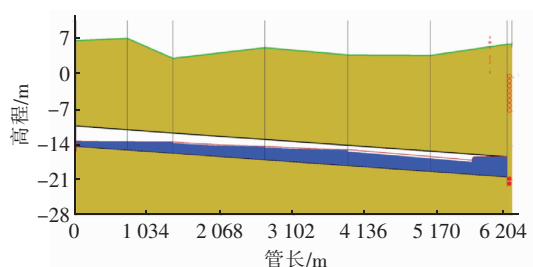
使用 TAP 模型分析该深隧系统在遭遇 50 年一遇 3 h 降雨条件下隧道内瞬变流发生的时间、位置及强度。

① 从各竖井开始入流至 01:27:27 时刻,隧道水力流态一直处于明流状态(如图 3 所示),隧道上游水流已转输至末端泵站,隧道最下游断面将首先被充满,此时末端排涝泵尚未开启,只有初雨泵开启运行,而初雨泵规模小于深隧系统入流规模。该时

刻标志着隧道水力流态即将由完全明流状态逐渐转为满流或明满流交替状态。



a. 隧道处于明流流态(01:27:27)



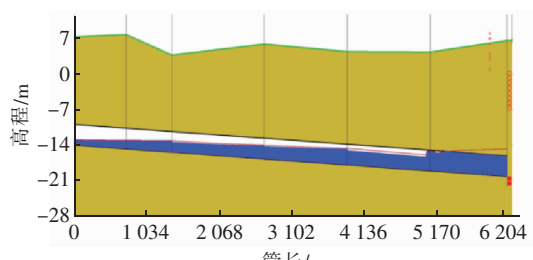
b. 隧道末端进入满流流态(01:30:18)

图3 隧道水力流态由明流向满流的转换过程

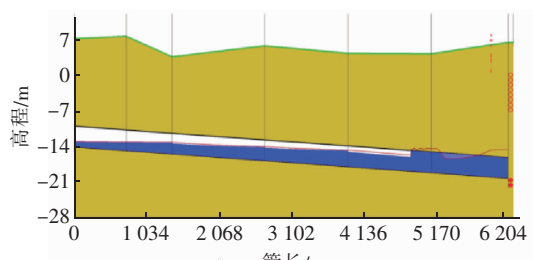
Fig. 3 Transformation process of flow regime from free

flow to pressurized flow

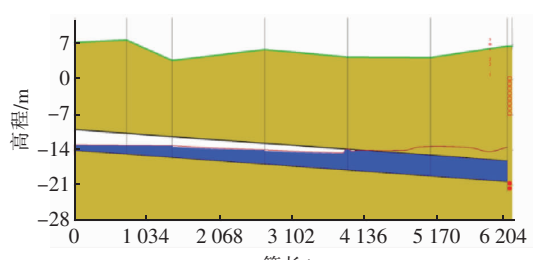
② 随着各竖井继续入流,水流不断被转输至隧道下游,隧道水力流态自下游向上游不断由明流转为满流。TAP模型模拟结果显示(见图4),隧道水力流态在明流向满流转换过程中,测压管水头线在遭遇Y6、Y5、Y4和Y3竖井时都会形成受困气穴并造成不同程度的负压和测压管水头线的波动。如前所述,该现象是由于向上游移动的水流遭遇过程型障碍物,形成一定程度的回水,其与迎面而来的水流将本该在竖井处释放的空气困在隧道内,并被迅速挤压消失最终形成负压。



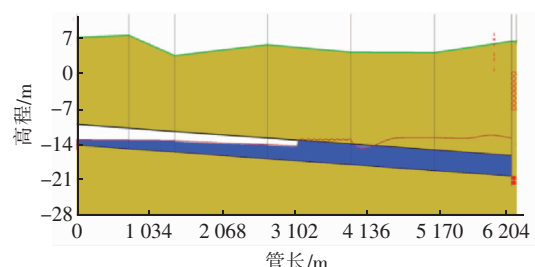
a. Y6 气穴(01:33:04)



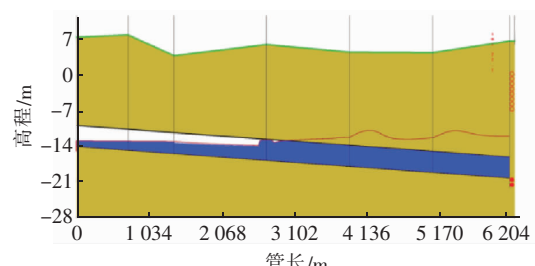
b. Y6 负压(01:33:35)



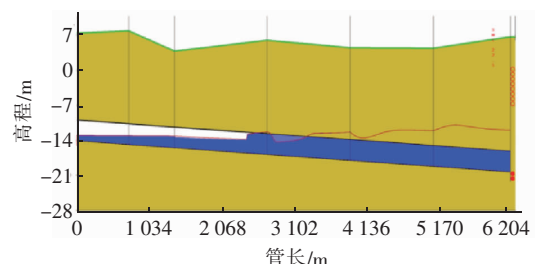
c. Y5 气穴(01:36:31)



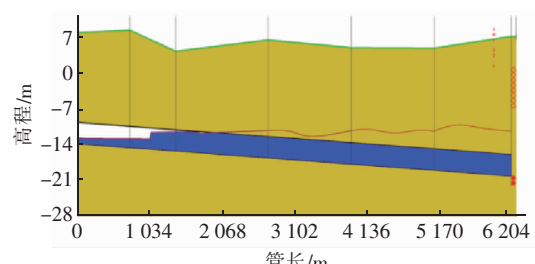
d. Y5 负压(01:36:56)



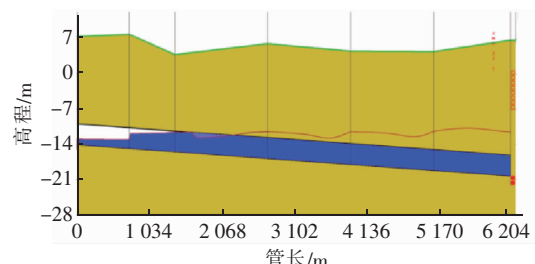
e. Y4 气穴(01:39:58)



f. Y4 负压(01:40:28)



g. Y3 气穴(01:45:20)



h. Y3 负压(01:45:55)

图4 水流遭遇竖井时产生受困气穴和负压过程

Fig. 4 Generation processes of air pocket and negative pressure

when flow encounter with drop shafts

结合模型输出文件,表2列出了在隧道填充过程中,向上游移动的水流沿程遭遇各竖井时产生受困气穴和负压的时间、持续时间以及大小。

表2 因水流遭遇过程型障碍物(竖井)导致的受困气穴和负压产生时间、持续时间和大小

Tab.2 Time, duration and size of air pocket and negative pressure due to the encounter of flow and way-along obstacles

项 目	受困气穴			负压		
	产生时刻	持续时间/s	初始大小 (长×高)/(m×m)	产生时刻	持续时间/s	最大负压/ kPa
Y6	01:33:04	16	233.0×0.35	01:33:35	126	10.3
Y5	01:36:31	10	124.4×0.31	01:36:56	106	7.6
Y4	01:39:58	20	172.7×0.48	01:40:28	146	14.5
Y3	01:45:20	20	212.3×0.35	01:45:55	80	10.3

③ 随着各竖井继续入流,当向上游移动的水流遭遇隧道上游末端(Y1竖井)时,由于没有继续向上游移动的通道,在Y1竖井附近产生回水,在Y2和Y3竖井之间形成一个受困气囊,见图5(a),初始大小:长×高=374.8 m×0.49 m,该气囊被其上游和下游带压水流不断挤压消失时形成的负压导致的测压管水头剧烈波动持续时间约75 s,负压值最大达31.7 kPa,如图5(b)所示。当隧道被完全充满后,测压管水头除在末端泵站泵组启停时有轻微波动,其他时段均处于相对稳定状态。

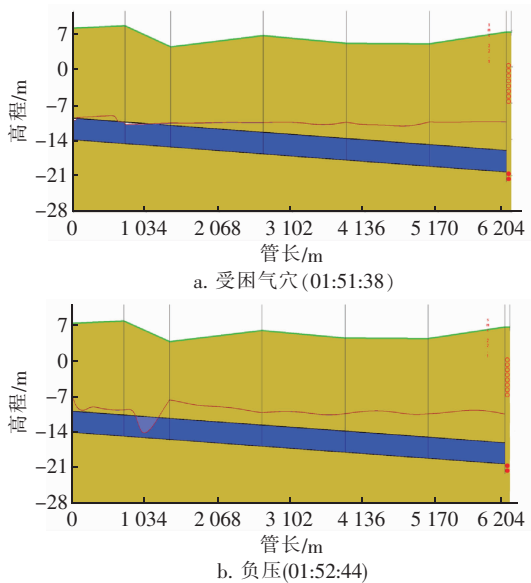


图5 Y2和Y3竖井之间形成的受困气穴和负压

Fig.5 Air pocket and negative pressure between drop shaft Y2 and drop shaft Y3

④ 在整个6 h的模拟过程中,各管段计算步长范围在0.03~0.6 s之间,管段Y1-Y2、Y2-Y3、Y3-Y4、Y4-Y5、Y5-Y6、Y6-末端泵站在模拟过程中被切分的管段数分别为184、163、330、297、297、274,计算次数分别为523 252、528 338、545 344、551 890、558 096、570 930。

4 结论

基于对深层排水隧道内浪涌现象成因的分析,总结量化分析瞬变流所需的必要条件,选择TAP模型模拟某深隧系统在快速填充工况下浪涌的形成过程,并对浪涌风险进行量化分析。模拟结果表明,水流遭遇过程型障碍物(如跌水竖井)时会因形成气穴而产生一定程度的负压,但负压危害相对较小(15 kPa以下);水流遭遇阻断型障碍物(如隧道上游末端)时,会产生更为剧烈的负压(31.7 kPa)。瞬变流模型的模拟结果可以为隧道衬砌设计提供参考,必要时可考虑在可能产生负压的管段处增加衬砌强度,以预防负压造成的结构性破坏。

参考文献:

- [1] WRIGHT S J, LEWIS J, VASCONCELOS J G, et al. Physical processes resulting in geyser formation in rapidly filling stormwater tunnels[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, 137(3): 199-202.
- [2] ROSSMAN L A. Storm water management model reference manual: volume II - hydraulics[R]. Cincinnati: Office of Research and Development, USEPA, 2017.
- [3] RIDGWAY K E, KUMPULA G. Surge modeling in sewers using alternative hydraulic software programs[J]. Journal of Water Management Modeling, 2008, 228(10): 155-164.
- [4] LEON A, OBERG N. Illinois transient model two-equation model user's manual[R]. Corvallis: Oregon State University, 2015.

作者简介:赵吉(1987-),男,江苏盐城人,硕士,高级工程师,研究方向为城市雨洪管理、海绵城市、深层排水隧道。

E-mail: zhaoji@newground.cn

收稿日期:2020-04-01

修回日期:2020-07-30

(编辑:刘贵春)