

双洞盾构隧道横通道与滑梯组合疏散合理间距研究

张奥宇^{1,2}, 邓敏^{1,2}, 胡彦杰^{1,2}

(1. 中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 武汉中交交通工程有限责任公司)

摘要: 为了确定水下盾构隧道疏散滑梯间距, 依托孟加拉国吉大港卡纳普里隧道工程, 采用 Pathfinder 疏散仿真软件建立人员疏散运动模型, 通过分别模拟 60、80、100 m 间距下隧道人员疏散运动时间, 从而确定隧道必须安全疏散时间(RSET)。研究结果表明: 100 m 疏散滑梯间距下的必须安全疏散时间超过规范允许值, 80 m 疏散滑梯间距情况下, 疏散滑梯的综合利用率优于 60 m 疏散滑梯间距情况, 对横通道疏散能力的依赖较小, 同时又可以满足规范对于隧道必须安全疏散时间的要求。

关键词: 水下隧道; 数值模拟; 人员疏散; 必须安全疏散时间

1 前言

水下隧道的建设具有不影响通航、节约宝贵的地面建设用地、缓解周围桥梁等设施的交通压力等优点。与一般山岭隧道相比, 水下隧道往往没有可以利用的横洞、斜井、竖井及平行导坑作为辅助疏散通道及通风单元, 隧道内防灾救援问题更加突出; 相比较城市隧道, 公路水下隧道长度更长, 与地面连接的出入口更少, 需要疏散的人员更加集中, 更容易发生人员拥挤的现象。

目前关于长隧道人员疏散路线的设计尚没有一个统一的标准, 需要结合隧道通风排烟设施及隧道实际土建现场条件综合考虑决定。目前国内外关于隧道人员逃生救援已经做了较多的研究。张先富结合妈海湾过江通道工程分工况分别分析了单层盾构隧道疏散和双层盾构隧道疏散的时间, 给出了妈海湾隧道最佳疏散模式及疏散滑梯设置间距; 姜献民等针对隧道发生火灾时人员恐慌心理造成的慌不择路, 设计了一种公路隧道智能疏散照明指示系统, 将消防疏散由静态“就近指示逃生”转化为动态远离火灾“安全引导逃生”; 屈建荣等结合 Crane 修正模型和 FED 死亡模型分别评价温度和 CO 对人员的影响, 给火灾可用安全疏散时间的确定提出了一种新的思路; 邓敏等针对单洞双层盾构隧道分析了隧道疏散通道的疏散能力, 并结合相

关行业规范验证了 6 min 黄金疏散准则; 方正等对隧道人员疏散方法进行了综合分析, 指出了各种隧道疏散方式的优缺点和适用条件, 得出了中国水下隧道采用的下沉式滑道间距; 高俊等分析了杭州过江通道火灾时人员安全疏散的影响因素, 得到了人员疏散通道的设置参数, 给水下隧道的消防设计提供了参考。目前在国外主要是土木工程与消防工程跨学科研究火灾人员疏散, 主要研究领域是房屋建筑; Ruggiero Lovreglio 等提出了疏散模型中人员不确定性的量化方法, 同时将 BIM、VR、AR 等用来评价疏散过程中人员的心理变化和疏散知识教育方面的应用; Enrico Ronchi 等运用目前主流的疏散模型软件结合实际工程进行人员疏散仿真分析, 对比了不同疏散模型结果的异同, 同时给出了造成这种异同的原因。

但是目前关于海外复杂交通条件下(货车比例高、交通量大)隧道疏散问题尚无经验可循, 需要结合当地人群特性及交通流情况采取隧道火灾性能化设计方法来进行研究。该文以孟加拉国吉大港卡纳普里隧道为工程依托, 利用 Pathfinder 建立隧道人员疏散仿真模型, 研究不同疏散模式下人员必须安全疏散时间, 以为海外水下双洞盾构隧道防灾救援策略的制定提供依据。

2 工程概况及人员车辆估算

孟加拉国吉大港卡纳普里隧道为双管单层盾构隧

道,隧道全长 3 400 m,其中盾构段长度 2 450 m,双向四车道。隧道横断面布置图见图 1。为了满足隧道发生火灾时的逃生救援要求,在隧道盾构段同时设置 3 处横通道和人员疏散滑梯以满足防灾救援的要求,详细布置见图 2。受困人员将通过疏散滑梯和相邻横通道进行逃生。根据国际道路协会(PIARC)的建议和公路隧道通风设计细则的相关规定,隧道内火灾规模设置为 30 MW。该文将考虑隧道内一处位置发生火灾情况下隧道内的人员疏散。

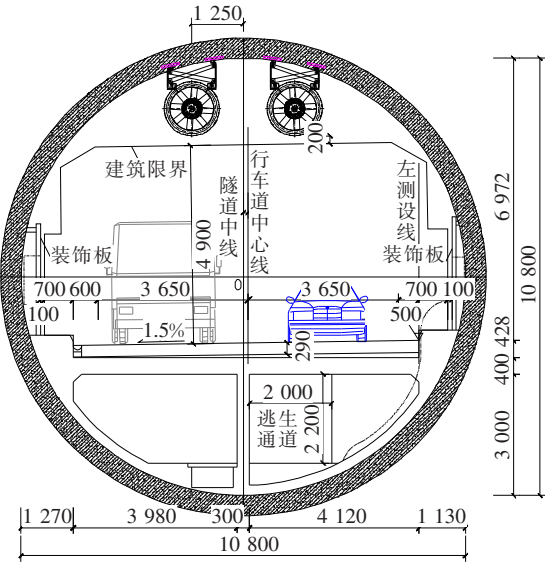


图 1 隧道横断面示意图(单位:mm)

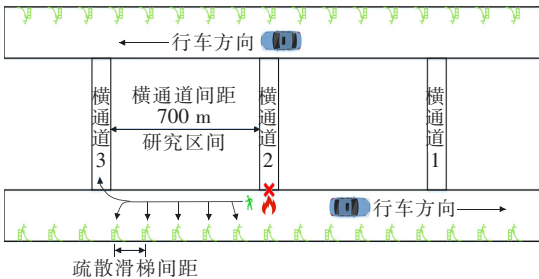


图 2 横通道布置示意图

待疏散人员的数量是整个疏散过程中很重要的设计参数,而影响隧道火灾疏散人数的影响因素主要包括:① 火灾的规模,火灾的影响距离(与隧道横通道布置情况有关);② 影响范围内的车辆数;③ 隧道内各种车型车辆的比例;④ 各种车辆的最大载人数。

通过对孟加拉国吉大港当地交通量进行统计分析得出车型比例分布情况见表 1。交通量按远期交通量(2035 年)进行考虑。

隧道内车辆间距取 1.5 m。隧道内火灾发生位置在横通道 2 时为最不利情况,此时人员不能利用横通

表 1 隧道内车型比例及车型尺寸

车型分类	车型比例/%	车型尺寸/(m×m)
大型客车	7.9	2.5×1.8
中型客车	12.0	6.0×1.8
小型客车	29.3	8.5×2.5
其他(货车)	50.8	10.5×2.5

道 2 进行逃生,疏散距离最长为横通道 2 到横通道 3 的距离为 700 m。此时结合车辆长度和疏散区间长度即可确定隧道内车辆数的具体分布情况,假设隧道内所有车辆均为满载,即小客车 4 人,中客车 7 人,大客车 45 人,其他均为 2 人。通过计算可以得出 700 m 区间共疏散人数为 816 人。

3 人员疏散场景设计

按照最不利原则考虑,火灾位于横通道 2 处,人员只能通过火源上游横通道 3 和疏散滑梯进行逃生,且疏散过程中认为人员进入沿线的 3 处横通道和位于隧道下方的疏散通道就说明疏散成功。人员行为具有随机性和从众性,人员将通过滑梯进入疏散通道进行逃生。该文将分别考虑不同疏散滑梯间距和滑梯参数分析得出疏散滑梯的最优参数。由于 Pathfinder 中对于滑梯默认处理为对人员行动速度无影响,不符合实际情况。该文借鉴前人的研究经验,对人在滑梯上的运动行为采用多段匀加速直线运动进行简化,如图 3 所示。

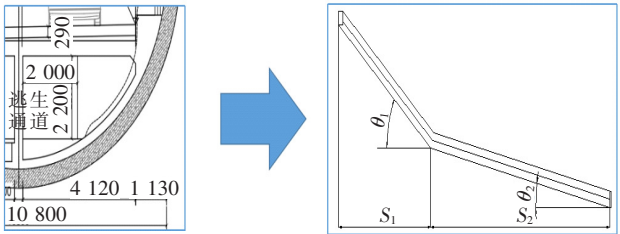


图 3 滑梯简化示意图(单位:mm)

从图 3 中可以看出:将人从滑梯滑下的过程分为两段匀加速直线运动,横向距离分别为 S_1 和 S_2 ,坡度倾角分别为 θ_1 和 θ_2 ,两段的加速度分别为 a_1 和 a_2 , μ 为静摩擦系数, g 为重力加速度, t_1 为滑行第一阶段所用的时间, t_2 为滑行第二阶段所用的时间, v_1 为第一阶段滑行完人所具有的速度, v_2 为第二阶段滑行完人所具有的速度。结合隧道内横断面实际情况,取值如

下: $S_1=1\text{ m}$, $S_2=1.5\text{ m}$, $\theta_1=48^\circ$, $\theta_2=25^\circ$, $g=9.8\text{ m/s}^2$, $\mu=0.4$,分别计算两端的加速度如下:

$$a_1=g\sin\theta_1-g\mu\cos\theta_1=4.66\text{ m/s}^2\tag{1}$$

$$a_2=g\sin\theta_2-g\mu\cos\theta_2=0.59\text{ m/s}^2\tag{2}$$

$$t_1=\sqrt{\frac{2S_1\cos\theta_1}{a_1}}=0.53\text{ s}\tag{3}$$

$$v_1=a_1t_1=2.50\text{ m/s}\tag{4}$$

$$v_2=\sqrt{2a_2S_2+v_1^2}=2.86\text{ m/s}\tag{5}$$

$$t_2=\frac{v_2-v_1}{a_2}=0.61\text{ s}\tag{6}$$

$$t=t_1+t_2=1.15\text{ s}\tag{7}$$

考虑到人员在进入滑梯时预备动作的时间以及滑行后起身的时间,统一假定为 5 s。故每个人通过滑梯进行疏散的时间是 6.15 s。滑梯宽度设置为 0.5 m,保证滑梯一次只能疏散一个人。在每一个疏散滑梯口处设置 wait 边界条件,即每个人在疏散滑梯口等待 6.15 s,保证每次滑梯疏散时只有一个人。该文通过建立不同疏散滑梯间距的 Pathfinder 模型计算人员疏散时间,根据中国相关项目的经验以及规范的要求(中国之前项目大多采取了 80 m 间距),采取了 60、80、100 m 共 3 种疏散横通道间距进行分析,疏散场景设置情况见表 2。

表 2 隧道火灾疏散场景

疏散场 景序号	疏散滑梯 间距/m	疏散场景说明
1	60	疏散滑梯之间间距为 60 m,人员初始位置和人员特性服从正态分布
2	80	疏散滑梯之间间距为 80 m,人员初始位置和人员特性服从正态分布
3	100	疏散滑梯之间间距为 100 m,人员初始位置和人员特性服从正态分布

Pathfinder 建立的模型如图 4 所示。人员速度分布采用正态分布,最大速度 1.8 m/s,最小速度 0.6 m/s,标准差为 0.2。

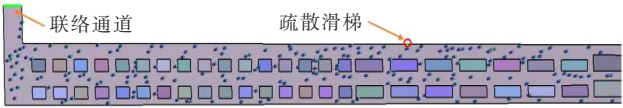


图 4 隧道内人员疏散模型示意图

4 分析与讨论

根据隧道内人员疏散的安全准则,可用安全疏散时间 (ASET) 必须超过需要的安全疏散时间 (RSET),如果满足此条件,就可以认为疏散方案成功可行。即:

$$ASET(\text{Available Safe Egress Time}) > RSET(\text{Required Safe Egress Time})\tag{8}$$

必须安全疏散时间 RSET 是指从起火时刻到人员疏散到安全区域的时间。紧急情况下的 RSET 包括火灾探测器报警时间(t_{alarm})、预动作时间(t_{pre})和人员疏散运动时间(t_{move})。

$$RSET=t_{\text{alarm}}+t_{\text{pre}}+t_{\text{move}}\tag{9}$$

其中根据隧道内安装的火灾报警装置的情况结合前人的研究经验,将探测报警时间设置为 60 s。根据 DGJ 08—88—2006《建筑防排烟技术规程》中的各种

用途的建筑内采用不同火灾广播系统时的人员预动作时间,将人员的预动作时间取为 60 s。

根据不同的疏散滑梯间距,通过建立 Pathfinder 模型,获得了不同场景的疏散运动时间。下面分别对隧道内每种疏散场景进行分析。

疏散场景 1、2、3 分别为远期交通量情况下,选取隧道内横通道 2 到横通道 3 之间区间为研究对象,长度为 700 m,疏散滑梯间距分别为 60、80、100 m 的情况进行疏散。数值模型计算的时间是人员从隧道内随机位置移动到疏散滑梯口和横通道所用的时间。总的疏散时间如图 5 所示。

由图 5 可知:

(1) 工况 1 疏散运动时间共计 554 s,加上 120 s 预疏散时间,必须安全疏散时间为 674 s。工况 1 的平均疏散时间为 197.2 s,疏散时间的标准差为 140.1。疏散距离方面,最大疏散距离为 158 m,标准差为 29.9 m。

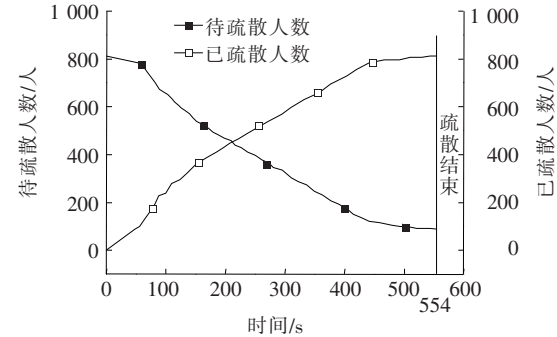
(2) 工况 2 疏散运动时间共计 748 s,加上 120 s 预疏散时间,必须安全疏散时间为 868 s。工况 2 的平均疏散时间为 199.8 s,疏散时间的标准差为 146.2。疏散距离方面,最大疏散距离为 192.3 m,标准差为 36.8 m。

(3) 工况 3 疏散运动时间共计 907.4 s,加上 120 s 预疏散时间,必须安全疏散时间为 1 027.4 s。疏散

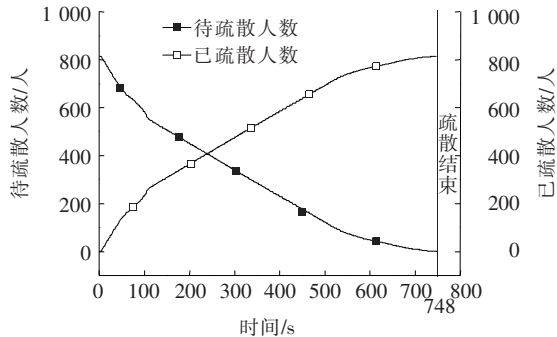
时间接近 17 min,根据公路水下隧道设计细则(试行稿)的说法,人员疏散时间不得大于 15 min,故此种工况无法满足人员逃生救援的需求。工况 3 的平均疏散时间为 314.5 s,疏散时间的标准差为 249.7 s。疏散距离方面,人员最大疏散距离为 254.6 m,标准差为 43.8 s。

由表 3 可知:相对于工况 1 和 2,当疏散滑梯间距为 60 m 时,疏散时间最小,但是相比较工况 2,疏散时间减少幅度不大;而工况 2 各疏散滑梯的疏散人流较工况 1 更加平均,疏散滑梯的整体利用率较高。结合工程成本,采用工况 2 可以在满足防灾救援要求的情况下,节约工程造价。

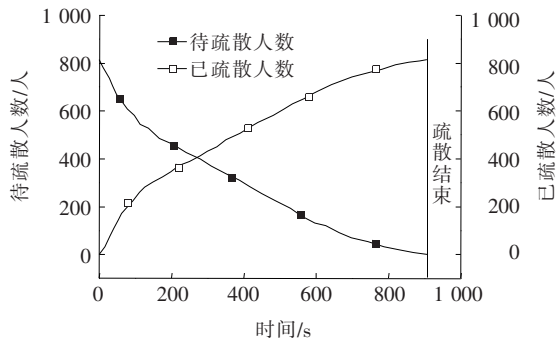
按照目前《公路水下隧道设计规范》第 13.9.2 条:火灾工况下水下隧道人员安全疏散时间应小于 15 min,设置有专用排烟道和泡沫喷雾设施时,安全疏散时间可放宽至 20 min。该隧道设计火灾规模为 30 MW,按照规范的要求没有设置泡沫喷雾设施,故人员安全疏散时间应小于 15 min,即 900 s。结合规范情况可以表明:工况 3 难以满足安全需求,工况 1 和工况 2 满足安全需求。针对工况 1、2,软件生成的结果文件中可以整理出人员疏散的相关信息。表 4、5 分别为工况 1、2 情况下平均人流量变化情况。



(a) 疏散场景 1(工况 1)



(b) 疏散场景 2(工况 2)



(c) 疏散场景 3(工况 3)

图 5 人员疏散运动时间

各工况下必须安全疏散时间汇总见表 3。

表 3 各工况必须安全疏散时间汇总

工况	疏散滑梯 间距/m	行走时 间/s	报警时 间/s	响应时 间/s	必须安全疏 散时间/s
1	60	554	60	60	674
2	80	748	60	60	868
3	100	907	60	60	1 027

表 4 疏散滑梯间距为 60 m 时疏散参数

疏散滑梯 与火源距 离/m	第一个人 进入时 间/s	最后一个人 离开 时间/s	总使 用人 数/人	平均人 流量/ (人·s ⁻¹)
横通道	1.2	136.7	130	0.96
660	0.6	426.4	59	0.14
600	2.2	423.5	58	0.14
540	2.3	418.7	58	0.14
480	0.8	398.1	55	0.14
420	1.0	392.9	54	0.14
360	1.6	408.4	56	0.14
300	0.7	447.4	61	0.14
240	0.7	579.5	79	0.14
180	2.2	522.1	70	0.13
120	1.1	515.1	71	0.14
60	0.6	469.0	65	0.14

表 5 疏散滑梯间距为 80 m 时疏散参数

疏散滑梯 与火源距 离/m	第一个人 进入时 间/s	最后一个人 离开 时间/s	总使 用人 数/人	平均人 流量/ (人·s ⁻¹)
横通道	1.2	256.7	152	0.59
620	0.6	546.1	75	0.14
540	2.2	546.9	74	0.14
460	0.6	515.7	70	0.14
380	0.7	526.2	72	0.14
300	0.7	590.5	81	0.14

续表 5

疏散滑梯 与火源距 离/m	第一个人 进入时 间/s	最后一个人 离开 时间/s	总使 用人 数/人	平均人 流量/ (人·s ⁻¹)
220	2.6	748.5	103	0.14
140	0.9	715.4	97	0.14
60	2.3	677.4	92	0.14

从表 4、5 可以看出:当疏散滑梯间距为 60 m 时,横通道的平均人流量为 0.96,远远大于其他疏散滑梯的平均人流量 0.14,这说明此工况下,人员疏散主要依赖横通道;当疏散滑梯间距为 80 m 时,横通道的平均人流量为 0.59,相比较 60 m 的工况,与其他疏散口的平均人流量差距在减小,疏散相较于 60 m 工况更为“平均”。可见,横通道疏散能力远远大于疏散滑梯,今后进一步的研究在于如何在传统滑梯设计上改进,提高疏散滑梯的疏散能力,减少公路水下隧道目前对于横通道的依赖程度。

水下隧道横通道建设风险高,故防灾救援的设计思路主要是减少横通道数量,使用辅助疏散设施进行疏散。目前由于孟加拉隧道断面尺寸有限,初步设计方案采取了滑梯方案,滑梯由于人员等待时间的原因,疏散能力上反而不如楼梯,故有必要结合疏散仿真进一步分析确定。

5 结论

围绕隧道内的人员疏散滑梯间距开展了仿真模拟研究,结合人员预疏散时间,通过设置 3 种不同疏散滑梯间距工况来研究最佳间距。结果表明:

- (1) 疏散滑梯间距为 100 m 时,不满足人员疏散安全需求。
- (2) 将疏散滑梯间距设置为 80 m 时,人员可以进行有效疏散;当减小滑梯疏散间距到 60 m 时,总的疏散时间减小幅度不大,疏散口的人流量表明疏散口的利用效率不高。故建议疏散滑梯设置间距为 80 m。
- (3) 由于吉大港隧道位于海外地区,有必要进行人员疏散方面的安全教育,增强人们的安全意识;同时后期应结合当地实际情况(人员年龄组成、性别比例等),制定出符合当地情况的人员疏散方案,有条件的

可以在孟加拉当地进行人员疏散演练以验证疏散仿真试验结果。

参考文献:

[1] 中国交通建设股份有限公司. 孟加拉国吉大港出海口大直径水下盾构隧道建设关键技术研究[R],2016.

[2] 张先富. 妈湾跨海隧道排烟技术及人员疏散研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文,2017.

[3] 姜献民,马春城,黄江,等. 公路隧道智能疏散照明指示系统的设计与实现[J]. 中外公路,2017(S2).

[4] 屈建荣. 单洞双向交通公路隧道火灾人员疏散救援研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2015.

[5] 邓敏,段平,胡彦杰,等. 火灾情况下某单洞双层盾构隧道人员疏散分析[J]. 安全与环境学报,2017(3).

[6] 朱华,方正. 武汉长江隧道疏散方式选择与观测分析[J]. 武警学院学报,2011(6).

[7] 高峻,谢宝超,徐志胜. 杭州过江隧道火灾时人员安全疏散研究[J]. 防灾减灾工程学报,2007(2).

[8] Ronchi E, Nilsson D, Kojić S, et al. A Virtual Reality Experiment on Flashing Lights at Emergency Exit Portals for Road Tunnel Evacuation[J]. Fire Technology, 2016, 52(3):623—647.

[9] Ronchi E, Colonna P, Capote J A, et al. The Evaluation of Different Evacuation Models for Assessing Road Tunnel Safety Analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012: 74—84.

[10] Lovreglio R, Ronchi E, Borri D. The Validation of Evacuation Simulation Models Through the Analysis of Behavioural Uncertainty[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 131(3):166—174.

[11] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路隧道通风设计细则[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.

[12] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 大型水下双层隧道防灾救援体系及消防配套综合技术研究报告[R],2013.

[13] Thunderhead Engineering, Pathfinder 2018 User Manual[EB/OL],2018.

[14] GB 51251—2017 建筑防烟排烟系统技术标准[S].

[15] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路水下隧道设计规范(试行稿)[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.