

城市水下双层隧道纵向疏散楼梯结构参数布设研究

李婷¹, 陈静曦¹, 梅羽²

(1. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430063; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 在分析隧道疏散过程中人群疏散特征的基础上, 以武汉两湖隧道设计数据为基础, 分析影响疏散的疏散楼梯结构参数, 建立 250 个疏散楼梯结构参数各不相同的 VISSIM 行人疏散模型进行仿真, 并对仿真结果进行曲线估计, 通过回归分析, 确定纵向疏散楼梯结构参数与疏散时间、密度间的函数关系, 提出城市水下双层隧道纵向疏散楼梯结构参数布设条件。

关键词: 交通安全; 水下双层隧道; 疏散楼梯; 结构参数

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)04-0047-05

水下双层隧道因受地理及环境条件限制小而日益频繁地出现在城市建设当中。但其结构特性复杂, 若发生事故, 消防救援条件不利。同时其为新兴结构, 目前无疏散通道规范参考, 大部分研究认为采用上下层纵向疏散楼梯作为双层隧道的疏散通道效果较好, 但并无研究确定疏散楼梯的结构参数。

在隧道内人员逃生速度方面, 1971 年 Fruin J. J. 首次提出行人楼梯运行速度, 并研究了两种不同坡度楼梯的行人运行速度分布, 提出了楼梯运行速度建议值; Frantzich H. 的研究表明行人在宽阔楼梯中行走的速度大于狭窄楼梯。但以上研究均为正常情况下行人的运行速度, 与紧急情况下行人运行速度存在差异。王江川以某多层建筑为载体开展疏散试验, 研究了紧急情况下单个行人及群体行人的各层逃生速度; 李之红认为 50 m 及 50 m × 8 往返跑的速度分布可作为紧急情况下行人逃生速度的参考。在隧道疏散方面, 奚学东等以武汉市某越江隧道盾构段为研究对象, 根据人员对火灾场景下烟气的忍耐能力建立行人疏散模型; 叶红梅利用 FDS 软件建立不同火灾强度下火灾烟气扩散模型, 分析了隧道内火灾扩散规律, 确定了可用疏散时间及所需安全疏散时间, 以此为条件确定了人员安全疏散方案。但以上研究未考虑行人密度过大而产生的拥挤踩踏等二次事故的影响, 可能与实际情况存在出入。赵凯强、张玉春等认为疏散通道间距及宽度对疏散通行能力影响显著, 逃生门洞间距越小、数量越多, 越有利于人群的安全疏散; Hoogendoorn S. P. 等认为疏散通道通行能力与其宽度间的关系并非线性,

而是阶梯状的, 因为较小的宽度变化无法引起行人层数变化, 而行人层数变化才是其通行能力变化的关键。以上研究仅研究了宽度、间距等单一因素对行人疏散的影响, 未考虑这些因素的耦合影响, 研究结论的普适性不强。该文利用武汉两湖隧道设计数据, 运用 VISSIM 软件建立多组疏散楼梯结构参数各不相同的疏散模型, 分析纵向疏散楼梯结构参数对行人疏散的耦合影响, 研究纵向疏散楼梯结构参数布设条件。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

以武汉两湖隧道设计数据为基础, 建立 250 个疏散楼梯结构参数各不相同的微观疏散模型进行仿真分析。该隧道为水下双层长隧道, 结构设计良好, 具有一定的代表性。其横断面结构见图 1, 其中车道宽 3.25 m, 隧道单层高度 5.1 m。

1.2 研究方法

隧道内最危险、最严重的事故为火灾。水下隧道一般较长, 火灾情况下难以通过离开隧道逃生, 车中乘客处于生命危险状态下, 疏散需求极高, 故主要研究火灾场景下的疏散问题。采用 VISSIM 仿真及回归分析方法研究紧急疏散楼梯结构参数对行人疏散的影响, 仿真参数主要包括疏散人群的个体特征、仿真模型评价指标即仿真模型输出结果、仿真研究范围及仿真疏散人群数量。因技术条件限制, 无法通过现场试验直接确定以上参数的确切数值, 加上目前水下双层隧道实例较少, 鲜有规范规定疏散楼

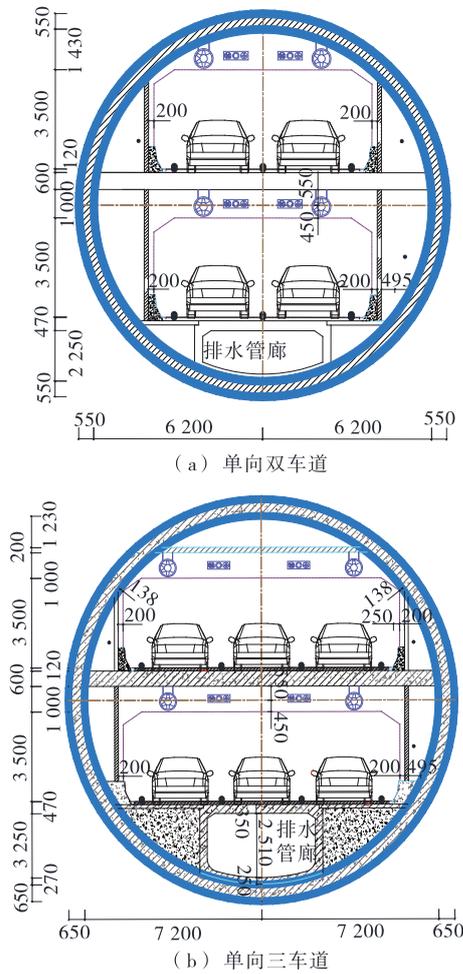


图1 武汉两湖隧道横断面示意图(单位:mm)

梯的结构尺寸参数,故采用理论分析法,以前人研究为基础加以分析计算。采用穷举法,在一定范围内列举疏散楼梯各结构参数取值,排列组合后建模进行仿真。根据前人研究成果,纵向疏散楼梯的主要结构参数包括疏散楼梯间距 a 、疏散楼梯疏散门宽度 b 、疏散楼梯宽度 c 、疏散楼梯高度 h 和疏散楼梯坡度 θ (见图2)。

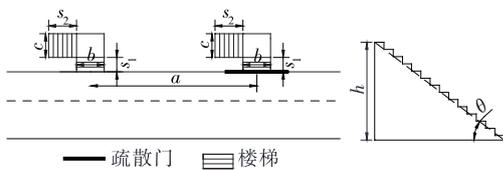


图2 纵向疏散楼梯的主要结构参数

通过 IBM SPSS 19.0 软件对仿真数据进行曲线估计,寻找各疏散楼梯结构参数与仿真评价指标间可能存在的关系,进而通过回归分析确定结构参数与仿真评价指标间的函数关系,结合行人安全疏散所需条件,得出疏散楼梯结构参数的布设条件,作为

城市水下双层隧道纵向疏散楼梯的设计依据。

2 仿真方案

2.1 仿真参数设定

2.1.1 仿真群体特征

以武汉两湖隧道为载体,疏散人群特征主要考虑武汉市人群数据,参考武汉市 2016 年统计年鉴,结合李之红的研究成果,得出仿真人群的身体特性,并计算得到其年龄构成及期望速度,在 VISSIM 仿真软件中进行设定。

2.1.2 评价指标确定

由于人对温度、CO 浓度等环境因素存在忍耐极限,火灾场景下必须在一定时间内完成疏散;同时若人群密度过大,易发生踩踏事故,疏散时对人群密度亦有一定要求。因此,选取疏散时间及疏散密度两个参数作为仿真评价指标。

火灾发生后,人员能否安全疏散取决于式(1)。

$$ASET > RSET \quad (1)$$

式中:ASET (Available Safety Egress Time) 为火灾发展到对人构成危险所需时间,即可用安全疏散时间;RSET (Required Safety Egress Time) 为火灾情况下人员疏散至安全场所所需时间,即所需安全疏散时间,可分解为:

$$RSET = t_{alarm} + t_{pre} + t_{move} \quad (2)$$

式中: t_{alarm} 为火灾探测报警时间; t_{pre} 为人员反应时间; t_{move} 为人员疏散时间。

现有规范没有对隧道内人员疏散时间给出明确要求。邓敏等对比水下双层隧道疏散与常规地铁站台疏散间的相似性,参考 GB 50157-2003《地铁设计规范》关于地铁站台疏散时间的规定,提出 RSET 不应超过 6 min、 t_{move} 不应超过 240 s。隧道内最后一名逃生人员进入疏散门视为全部安全疏散,通过 VISSIM 软件记录疏散模型中各疏散门最后一名逃生人员的进门时间,取其最大值作为最大人员疏散时间 t_{move} 。

根据相关研究,人群密度过大是发生拥挤踩踏事故的直接原因,国内学者通过分析不同民族个体生理尺寸差异,认为 9 人/m² 是拥挤场景发生踩踏事故的判断标准。据此设定疏散过程中疏散人群密度不宜大于 9 人/m²。由于疏散楼梯疏散门的瓶颈效应,疏散门口处更拥挤,人群密度更大,故在疏散门口处设置检测块检测仿真中该处的最大人群密度。记录疏散模型中各疏散门口的最大人群密度,

取其最大值作为疏散过程中的最大人群密度 ρ 。

2.1.3 仿真范围

将所需安全疏散时间 $REST$ 定为6 min。根据《公路隧道消防技术规范》,在火灾最大热量释放值50 MW的情况下,对人体致死的温度对应的扩散距离为150 m,CO浓度对应的扩散距离为225 m,故火灾影响范围为火源至上游225 m处。据此将仿真范围设为225 m。

2.1.4 疏散人群数量

待疏散人员数量是VISSIM仿真建模中的重要参数,其影响因素主要包括疏散模型研究范围的长度、疏散模型长度内的车辆数及车辆的载人数量。仿真模型中的疏散长度取225 m,因隧道内发生火灾后道路无法通行,将会形成阻塞,车辆间的间距取1 m,而城市隧道内允许通行的车辆几乎均为小汽车,标准小汽车长度取4.4 m,则标准化的车头间距为5.4 m。同时设定平均每辆小客车载人3人。综上,根据隧道内不同车道数,确定表1所示待疏散人员数量。

表1 不同车道数情况下待疏散人数

| 车道数/条 | 车辆数/pcu | 待疏散人数/人 |
|-------|---------|---------|
| 2 | 83.3 | 250 |
| 3 | 125.0 | 375 |

2.2 仿真设计

建模采用一定范围内的穷举法,为使仿真结果真实可信,同时减少建模工作量,对上文5个结构参数进行简化合并。武汉两湖隧道单向双车道及三车道断面层间高度均为5.1 m,故将纵向疏散楼梯整体高度 h 确定为5.1 m。由于规范规定隧道断面行车界限高度最低为3.5 m,同时隧道横断面内应预留射流风机布设位置,故多数双层隧道的层间高度接近5.1 m,仿真确定疏散楼梯高度为5.1 m具有一定的代表性。相关研究表明,行人在坡度约 30° 的楼梯上行走最舒适,该坡度也为大多数楼梯的设计坡度,故确定疏散楼梯坡度 θ 为 30° 。简化后主要结构参数包含疏散楼梯间距 a 、疏散楼梯疏散门宽度 b 、疏散楼梯宽度 c 。

结合前人对疏散门间距的研究及CJJ 37-2016《城市道路工程设计规范》关于疏散门宽度不小于1.2 m、疏散楼梯宽度不小于0.8 m的规定,确定表2所示疏散楼梯仿真模型各结构参数取值。

根据各结构参数间的组合及不同车道数,共建

表2 仿真模型各结构参数取值

| 疏散楼梯间距 | 疏散门宽度 | 疏散楼梯宽度 | 疏散楼梯间距 | 疏散门宽度 | 疏散楼梯宽度 |
|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
| a/m | b/m | c/m | a/m | b/m | c/m |
| 36 | 1.2 | 0.8 | 72 | 1.8 | 1.4 |
| 48 | 1.4 | 1.0 | 84 | 2.0 | 1.6 |
| 60 | 1.6 | 1.2 | | | |

立250个疏散楼梯结构各不相同的仿真模型,分别为单向双车道情况125个、单向三车道情况125个。对各仿真模型进行疏散模拟,统计各模型的整体疏散时间及最大人群密度。

疏散场景选取隧道下层起火,行人由下至上疏散的情况。纵向疏散楼梯模型采取较简单的疏散门楼梯—转向平台—疏散楼梯模型(见图3)。

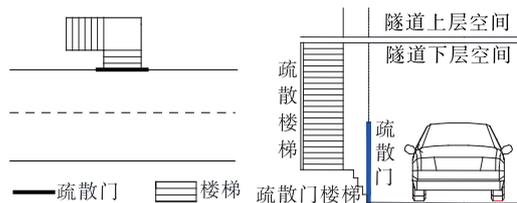


图3 纵向疏散楼梯示意图

每个模型的研究范围为225 m。为提供不同位置行人最优逃生路径,根据疏散楼梯间距,在建立模型时整体建模长度稍长于225 m(保证各位置行人附近均有可供选择的纵向疏散楼梯)。同时考虑起火点的最不利位置,将起火点设置于疏散楼梯入口处,该疏散楼梯附近行人无法通过疏散楼梯逃生,仅能通过起火点上游下一处疏散楼梯逃生。仿真开始后,行人于隧道内各位置生成,根据所在位置距各疏散楼梯的距离自主选择逃生路线(见图4)。



图4 仿真初期行人生成

(双车道, $a=60\text{ m}$, $b=1.2\text{ m}$, $c=0.8\text{ m}$)

随着仿真的进行,由于疏散楼梯疏散门的通行能力瓶颈及疏散楼梯行人速度骤降,行人会围绕在疏散门周围形成局部拥堵(见图5)。最终所有逃生行人通过疏散楼梯到达隧道上层,行人疏散结束,记录整体疏散时间及疏散门外部附近行人最大密度。

3 仿真结果分析

3.1 曲线估计

以125组单向双车道仿真数据为基础,将每5

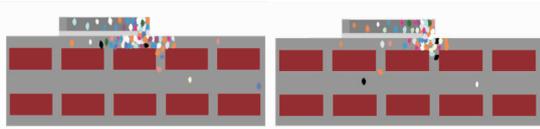
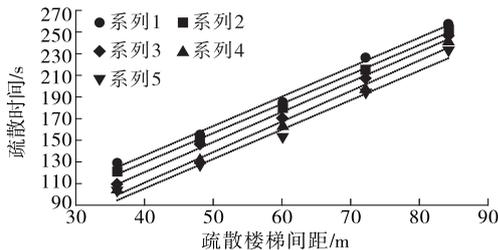


图5 疏散门周围局部拥堵

(双车道, $a=60\text{ m}$, $b=1.2\text{ m}$, $c=0.8\text{ m}$)

组疏散楼梯间距 a 值不同、但疏散门宽度 b 及疏散楼梯宽度 c 完全相同的数据整合为 1 个系列,共整合为 25 个系列。绘制疏散楼梯间距 a 及整体疏散时间 t_{move} 散点图,并进行初步回归,系列 1~5 曲线估计见图 6。系列 6~25 的情况与系列 1~5 相似,因篇幅限制,其余系列散点图不再列出。



$R_{\text{系列}1}^2=0.994\ 2$; $R_{\text{系列}2}^2=0.997\ 1$; $R_{\text{系列}3}^2=0.985\ 3$;
 $R_{\text{系列}4}^2=0.992\ 0$; $R_{\text{系列}5}^2=0.993\ 0$ 。

图6 单向双车道疏散楼梯间距 a 与整体疏散时间 t_{move} 曲线估计(系列 1~5)

从图 6 可看出:疏散楼梯间距 a 与疏散时间 t_{move} 成线性关系,相关系数 R^2 均在 0.95 以上,拟合情况良好,可认为疏散楼梯间距 a 与疏散时间 t_{move} 间具有线性关系。

同理可得出双车道及三车道情况下结构参数与疏散时间、密度间的关系(见表 3)。从表 3 可看出:疏散门宽度 b 与整体疏散时间 t_{move} 间不存在关系。其原因可能是因为当疏散楼梯宽度 c 不变时,疏散门宽度 b 增加仅能增加疏散楼梯中疏散入口平台的

面积,但无论平台面积如何增大,依然不可能同时容纳所有逃生行人,疏散楼梯宽度 c 不变时,疏散楼梯中行人疏散速度不变,疏散平台中行人离去速度也不变,外部行人进入疏散楼梯的速度亦不会产生变化,故整体疏散时间 t_{move} 不产生变化。

表3 纵向疏散楼梯结构参数与疏散时间和密度的关系

| 项目 | 疏散楼梯间距 a | 疏散门宽度 b | 疏散楼梯宽度 c |
|--------|------------|-----------|------------|
| 整体疏散时间 | 线性 | — | 线性 |
| 最大人群密度 | 线性 | 线性 | 线性 |

3.2 回归分析

依照表 3 中关系对仿真数据进行线性回归,得出单向双车道及三车道情况下疏散楼梯结构参数与疏散时间、密度间的函数关系,其中单向双车道整体疏散时间关系见式(3),单向双车道最大人群密度关系见式(4),单向三车道整体疏散时间关系见式(5),单向三车道最大人群密度关系见式(6)。4 个函数的 R^2 均大于 0.95,说明其拟合情况良好。其 T 检验及 F 检验结果见表 4。各拟合函数 F 检验及 T 检验的 sig 值均小于 0.05,证明函数各变量系数拟合良好,可认为 4 个线性函数关系均成立。

$$t_{\text{move}} = 2.775a - 39.640c + 57.524, R^2 = 0.993 \quad (3)$$

$$\rho = 0.068a - 2.352b - 3.891c + 11.266, R^2 = 0.983 \quad (4)$$

$$t_{\text{move}} = 4.000a - 64.180c + 64.084, R^2 = 0.985 \quad (5)$$

$$\rho = 0.051a - 2.049b - 3.209c + 12.897, R^2 = 0.996 \quad (6)$$

表4 拟合函数 F 检验及 T 检验结果

| 检验方法 | 项目 | 单向双车道检验结果 | | 单向三车道检验结果 | |
|------|-----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | t_{move} | ρ | t_{move} | ρ |
| F 检验 | 整体 | 3.07×10^{-134} | 3.16×10^{-107} | 1.07×10^{-111} | 4.17×10^{-143} |
| | 常数 | 1.61×10^{-56} | 4.01×10^{-99} | 3.11×10^{-28} | 2.70×10^{-153} |
| T 检验 | a | 6.27×10^{-134} | 1.88×10^{-88} | 4.90×10^{-111} | 4.62×10^{-121} |
| | b | — | 1.13×10^{-61} | — | 6.87×10^{-100} |
| | c | 1.01×10^{-60} | 2.23×10^{-86} | 3.51×10^{-46} | 4.49×10^{-123} |

3.3 结构参数布设条件

根据行人疏散需求分析,若需隧道内行人全部安全疏散,则整体疏散时间及最大人群密度需同时

满足安全要求。结合 CJJ 37—2016《城市道路工程设计规范》规定的部分纵向疏散楼梯结构参数要求,总结出表 5 所示纵向疏散楼梯结构参数布设条件。

表 5 纵向疏散楼梯结构参数布设条件 m

| 车道数 | 结构参数布设条件 |
|-------|---|
| 单向双车道 | $2.775a - 39.640c + 57.524 < 240$ |
| | $0.068a - 2.352b - 3.891c + 11.266 < 9$ |
| | $b \geq 1.2$ $c \geq 0.8$ |
| 单向三车道 | $4.000a - 64.180c + 64.084 < 240$ |
| | $0.051a - 2.049b - 3.209c + 12.897 < 9$ |
| | $b \geq 1.2$ $c \geq 0.8$ |

由于研究疏散场景中只存在小客车,同时疏散楼梯坡度指定为 30°,故表 3 中布设条件仅适用于通过车辆均为小客车且疏散楼梯坡度接近 30°的城市水下双层隧道。

4 结论

(1) 行人的个体特征如年龄、性别等均会对逃生速度产生影响,仿真时需根据仿真群体的个体特征分布确定适宜的行人逃生期望速度。

(2) 行人在火灾场景下逃生对整体疏散时间及人群密度均有需求,城市水下双层隧道行人疏散所需安全时间为 6 min,其中可供行人移动的时间为 240 s,疏散过程中行人的的人群密度不宜大于 9 人/m²,否则易发生拥挤踩踏等二次事故。

(3) 纵向疏散楼梯的主要结构参数为疏散楼梯间距 a 、疏散楼梯疏散门宽度 b 、疏散楼梯宽度 c 、疏散楼梯高度 h 及疏散楼梯坡度 θ 。以武汉两湖隧道为载体,简化疏散楼梯结构参数后保留前 3 个参数。

(4) 疏散楼梯间距 a 及疏散楼梯宽度 c 与整体疏散时间 t_{move} 成线性关系,疏散楼梯疏散门宽度 b 与整体疏散时间 t_{move} 没有关系;疏散楼梯间距 a 、疏散楼梯疏散门宽度 b 及疏散楼梯宽度 c 与最大人群密度 ρ 成线性关系。

参考文献:

[1] 赵凯强,刘万福,王国卓,等.异形结构隧道火灾安全疏散研究[J].消防科学与技术,2016(3).

[2] 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,2017,17(3).

[3] Fruin J J. Pedestrian planning and design[J]. New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.

[4] Frantzich H. Study of movement on stairs during evacuation using video analysing techniques[J]. Journal of Hygiene, 1996, 81(2).

[5] 王江川. 多层建筑长距离楼梯疏散速度实验研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.

[6] 李之红. 基于差异化个体特性的密集客流疏散行为分析与建模[D]. 北京:北京交通大学,2017.

[7] 奚晓东,胡江文,姜学鹏. 公路隧道火灾人员逃生概率计算[J]. 消防科学与技术,2015(8).

[8] 叶红梅. 公路隧道火灾扩散及人员疏散研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.

[9] 张玉春,向月,何川,等. 公路隧道横通道人员疏散行为及通行能力实验研究[J]. 西南交通大学学报,2016, 51(4).

[10] Hoogendoorn S P, Daamen W. Pedestrian behavior at bottlenecks[J]. Transportation Science, 2005, 39(2).

[11] Hoogendoorn S P, Daamen W, Bovy P H L. Microscopic pedestrian traffic data collection and analysis by walking experiments: behaviour at bottlenecks [A]. Pedestrian and Evacuation Dynamics[C]. 2003.

[12] 冉丽君,刘茂. 人群密度对人群拥挤事故的影响[J]. 安全与环境学报,2007,7(4).

[13] 李桂萍. 崇明越江隧道火灾场景和安全疏散的研究[D]. 上海:同济大学,2007.

[14] 王晓波. 长大隧道火灾安全疏散研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(5).

收稿日期:2018-10-29

(上接第 27 页)

[7] 王少伟. 智能建筑与物联网结合的研究[D]. 西安:长安大学,2012.

[8] P Manikonda, A K Yerrapragada, S S Annasamudram. Intelligent traffic management system[A]. IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology[C]. 2011.

[9] I Parra Alonso, D F Llorca, M Gavilan, et al. Accurate

global localization using visual odometry and digital maps on urban environments[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(4).

[10] M Bertozzi, L Bombini, A Broggi, et al. A framework for developing intelligent-vehicle vision applications [J]. IEEE Intelligent Systems, 2008, 23(1).

收稿日期:2018-11-27