

基于 BIM 的洪灾场景地铁疏散快速模拟

陈柯吟, 郑哲, 林佳瑞*, 周育丞

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

【摘要】目前, 地铁系统具有容量大、效率高、污染小、能耗低等特点, 已经成为最受欢迎的出行方式之一。近年来, 极端气象灾害频发, 洪涝灾害等对地铁系统运行及人员安全带来巨大影响。因此, 本文面向洪灾影响下的地铁行人疏散, 提出一种基于 BIM 的高效模拟方法。系列仿真实验表明, 洪水的入侵单宽流量、进水口宽度、车站的布局、疏散行人数量等因素对洪灾下的地铁行人疏散过程具有显著影响, 为有效提高疏散效率需考虑减小入侵单宽流量、进水口宽度、优化车站布局的相关措施。

【关键词】地铁车站; 洪灾; AnyLogic; 行人疏散; BIM; 韧性城市; 基础设施

1 引言

地铁系统集中在城市中客流量最大的走廊和活动中心^[1], 随着地铁客运量的不断增加, 其应对自然灾害的脆弱性也越来越高^[2]。地铁中乘客密度高, 人们的活动空间相对狭小, 且地下空间封闭, 如果发生自然灾害, 会在乘客中引起更严重的恐慌^[3]。地铁车站应急疏散过程涉及到个体行为、个体之间的相互作用、环境影响等诸多因素^[4]。如何在行人疏散过程中把握行人的运动规律, 探索提高疏散效率的方法成为一个重要的研究课题, 对于减少人员伤亡和财产损失具有重要的现实意义。

目前针对地铁站人群疏散的仿真研究主要集中在发生火灾与重大客流方面, 发生洪涝灾害的情况尚未引起足够重视, 在地铁设计相关的标准和规范中也很难找到防洪相关的明确规定和要求^[5]。而在各种类型的自然灾害中, 洪水被认为是地球上最常见、最具破坏性的现象^[6]。在地下空间水侵研究方面, 目前的研究主要集中在洪水入侵机理与脆弱性分析, 针对行人疏散的仿真研究较少。因此洪涝灾害过程中的人群疏散问题应该引起重视。

2 研究方法

针对上述问题, 本文将基于 AnyLogic 进行洪灾场景下的行人疏散模拟, 为了迅速获得 AnyLogic 模型中的仿真参数, 本文将结合考虑洪水影响的研究理论和 BIM 模型中读取的 IFC 文件数据使用 Python 进行界面开发, 以计算行人参数, 同时设计 AnyLogic 的仿真界

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(项目号 72091512, 51908323)

【作者简介】林佳瑞(1987-), 男, 助理研究员。主要研究方向为智能建造、数字孪生与数字防灾技术。E-mail: lin611@tsinghua.edu.cn

面以直接改变不同疏散情景下的仿真参数，而无需反复进入模型中进行参数设置，提出一种洪灾场景下人群疏散模拟的方法，并对疏散结果进行分析。

3 积水影响下的疏散模型

3.1 行人速度计算

由于洪水的复杂性和混乱性，洪水淹没建模中存在着许多不确定性^[7,8]。本文参考《日本地下空间浸水时避难安全检证法试行案》，对洪水淹没过程进行简化，认为当积水深度达到 70 cm 时行人无法行走，速度为 0，当积水深度小于 70 cm 时，积水深度匀速上升，行人的行走速度线性折减，可以用线性内插法计算^[5,9]，计算公式如下所示。

(1) 水深更新速度

$$V_1 = \frac{(B_1 - B_2)q}{A_1} \quad (1) \quad V_2 = \frac{B_2 q}{A_2} \quad (2) \quad V_w = \frac{(A_1 V_1 + A_2 V_2)}{A_1 + A_2} \quad (3)$$

式中： V_1 ——站厅层的水深更新速度(m/s)； A_1 ——站厅层乘客使用空间面积(m²)； V_2 ——站台层的水深更新速度(m/s)； A_2 ——站台层乘客使用空间面积(m²)； V_w ——车站水深更新的平均速度(m/s)； B_1 ——进水口的宽度(m)； B_2 ——站台层至站厅层的疏散通道宽度(m)； q ——入侵单宽流量(m³/s/m)。

(2) 行人在疏散开始时的速度

$$V_0 = (1 - \frac{h_0}{0.7})V \quad (4)$$

式中： V ——不考虑洪水影响时行人的行走速度 (m/s)； h_0 ——疏散开始时站台的积水深度(m)。

(3) 行人在疏散过程中的速度

$$\alpha_t = \frac{V_w V_0}{0.7 - h_0} \quad (5) \quad V_t = V_0 - \alpha_t t \quad (6)$$

式中： α_t ——行人行走速度随着积水深度上涨的线性折减系数(m/s²)； V_t ——行人疏散行人在开始疏散后 t 时的期望速度(m/s)。

3.2 疏散时间计算

参考火灾场景下 RSET (疏散总时间, Required safety Escape Time)和 ASET (可用安全疏散时间, Available safety Escape Time)的概念以及《日本地下空间浸水时避难安全检证法试行案》^[5,9,10]来计算疏散时间。

(1) 感知地下空间浸水危险性的时间

采用站台层水深达到 10 cm 的时间作为感知地下空间浸水危险性的时间 t_1 (s)：

$$t_1 = \frac{0.1}{V_2} \quad (7)$$

(2) 传达避难信息的时间

传达避难信息的时间 t_2 (s) 指在注意到地下空间浸水危险后, 将避难信息统一传达给全体人员并判断避难行动必要性所需的时间设定避难行动决策时间为 3min:

$$t_2 = (\frac{\sqrt{A_2}}{30} + 3) \times 60 \quad (8)$$

(3) 行人疏散过程的时间

行人疏散过程的时间 t_a (s) 指 AnyLogic 中每一个行人从 pedSource 模块行人产生到 pedSink 模块行人消失的总时间, 是站台层的行人感知到浸水危险并判断避难行动的必要性后疏散至地面的全过程所消耗的时间, 可以从 AnyLogic 中获得。

因此, 疏散总时间 t_{sum} (s) 为:

$$t_{sum} = t_1 + t_2 + t_a \quad (9)$$

(4) 可用安全疏散时间

参考火灾疏散中 ASET 的概念, 在本文中, 将车站积水深度达到 70cm 的时间作为可用疏散时间, 即 ASET (s):

$$ASET = \frac{0.7}{V_w} \quad (10)$$

行人安全疏散的条件即为: $t_{sum} \leq ASET$ (11)

当 $t_{sum} = ASET$ 时, 安全疏散的行人数量与总人数之比即为安全疏散百分比。

4 基于 BIM 的行人参数计算

建立好的 BIM 模型如图 1 所示, 利用 IfcOpenShell 来使用 BIM 模型对应的 IFC 文件格式, 读取站厅和站台层面积, 然后利用 Qt Designer 进行界面开发, 根据疏散模型中对应的计算公式在 Python 中添加代码并使用命令实现按钮触发, 当输入出入口宽度、入侵单宽流量、感知浸水危险时的水深、行人初始速度等参数时点击计算按钮即可实现行人特征参数计算, 如图 2 所示。

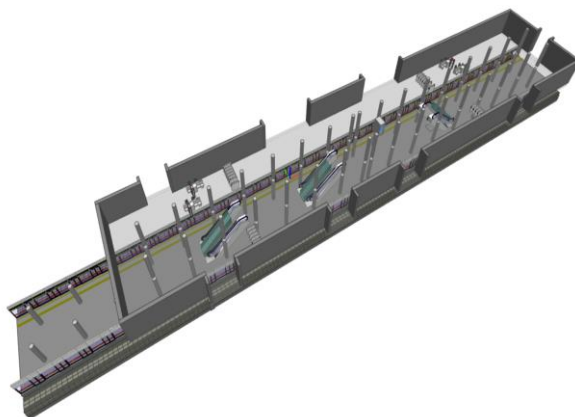


图 1 BIM 模型三维视图



图 2 调用界面示意图

5 基于 AnyLogic 的洪灾疏散仿真模型

5.1 地铁站环境模型的构建

将构建好的 BIM 模型以“.dxf”的格式导入 AnyLogic 中作为背景图，以“1m=3.5 像素”比例尺来绘制空间标记，然后布置检票闸机、安检机等，构建地铁车站的物理环境并对疏散通道编号，如图 3 所示。

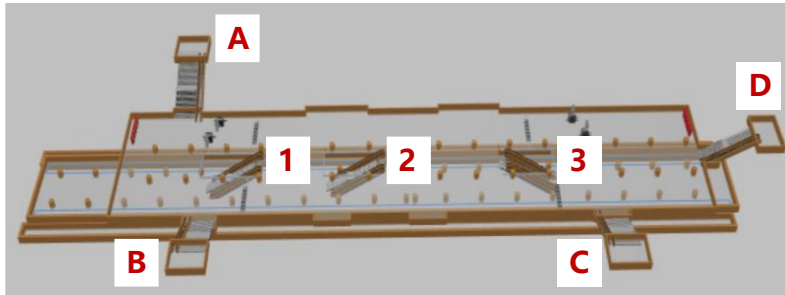


图 3 地铁站环境模型及疏散通道示意图

5.2 行人行为模型的创建

本文的疏散对象主要为在站台层的乘客，并采用运行速度为 0 的扶梯组来模拟楼梯。对于行人参数的设置，将行人的直径设置为(0.4 m, 0.5 m)的随机分布^[11]，在不考虑洪水影响时取行人疏散的平均速度为 1.34 m/s^[12-15]。用 event 模块表示考虑洪水上涨影响的速度规则，用函数表示行人对于最近疏散通道的选择。行人疏散流程图如图 4 所示。

5.3 模拟仿真界面的创建

利用演示中的文本、控件中的编辑框和按钮来创建界面，如图 5 所示，通过该界面可以设定不同疏散场景模拟过程中行人的速度折减系数、疏散行人的数量、行人的初始平均速度、感知浸水危险的时间、传达避难信息的时间以及楼扶梯运行状况，而不需要在模型中寻找参数进行修改，从而减少工作量，提高工作效率。

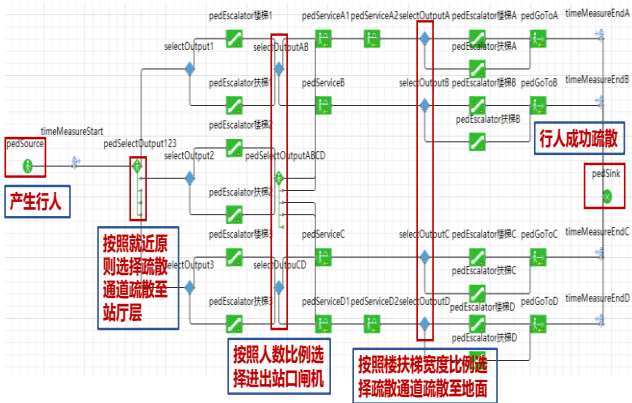


图 4 行人疏散流程图



图 5 模拟界面示意图

6 仿真分析

6.1 疏散场景设置

设置十二个不同的洪灾疏散场景，选取入侵单宽流量为 0.05 、 $0.28 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 、设定扶梯运行状况、疏散行人数量、进水口宽度为变量，以安全疏散比例为指标对疏散效果进行评估。

6.2 结果分析与结论

本文的主要的研究结论总结如下：

(1) 洪水的入侵单宽流量和进水口的宽度会很大程度上影响行人开始疏散时的速度从而会影响疏散过程的时间，同时会对水深更新速度和可用疏散时间造成较大影响。

(2) 疏散行人越多，疏散过程中行人密度越大，疏散过程中所需要的时间越长，行人数量对疏散总时间和安全疏散比例影响较大，如图 6 所示。扶梯运行状况会对疏散总时间和安全疏散比例造成影响但是影响不大。

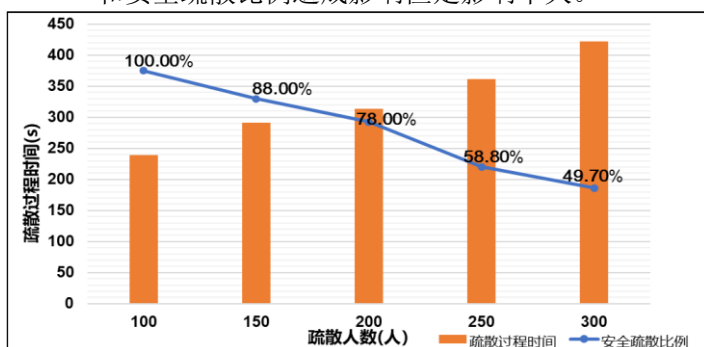


图 6 疏散过程时间及安全疏散比例随疏散人数变化情况



图 7 人群聚集现象示意图

(3) 疏散过程中的疏散通道入口，距离楼扶梯过近的立柱的位置是主要的疏散瓶颈所在，如图 7 所示。调整疏散瓶颈处立柱的位置，增加疏散通道的宽度，可以提高疏散效率。

(4) 在疏散过程中出入口和楼扶梯等设施分布不均衡会导致各设施及出入口的利用不均衡从而延长疏散的时间，降低疏散效率。随着行人数量的增加，各出入口平均疏散时间的标准差也增大，如表 1 所示。优化车站布局可以改善这种现象，提高疏散效率。

表 1 各出入口平均疏散时间均值及标准差

疏散人数	各出口平均疏散时间均值(s)	各出口平均疏散时间标准差(s)
100	176.81	18.85
200	201.94	28.25
300	245.82	39.05

(5) 在车站出入口处设置排水沟或防淹挡板可以减慢洪水入侵速度，有效提高疏散效率，缩短疏散时间^[5]。

7 结论与展望

本文的研究以典型地铁站为基础, 构建了洪灾场景下的行人疏散模型, 提出了基于 BIM 的行人参数计算方法, 建立了基于 AnyLogic 的洪灾疏散仿真模型, 并在此基础上分析了不同参数对洪灾下行人疏散效率的影响规律, 提出了相应的改进建议。但是由于疏散过程中的影响因素过多, 而本文仅对部分问题的某些方面进行了探讨, 不能精确的对所有问题进行分析。本文的研究还有很多不足之处: 没有考虑到洪水作为流体对行人速度的动态影响, 且仿真过程中仅考虑了站台层候车区域的乘客疏散, 在今后的研究工作中, 可以尝试建立更加切合实际的仿真模型。

参 考 文 献

- [1] Yang Y, Liu Y, Zhou M, et al. Robustness assessment of urban rail transit based on complex network theory: a case study of the beijing subway[J]. Safety Science, 2015, 79: 149-162.
- [2] Sun D J, Guan S. Measuring vulnerability of urban metro network from line operation perspective[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 94: 348-359.
- [3] Forero-Ortiz E, Martinez-Gomariz E. Hazards threatening underground transport systems[J]. Natural Hazards, 2020, 100(3): 1243-1261.
- [4] Bernardini G, Camilli S, Quagliarini E, et al. Flooding risk in existing urban environment: from human behavioral patterns to a microscopic simulation model[J]. Energy Procedia, 2017, 134: 131-140.
- [5] 莫伟丽. 地铁站水侵过程数值模拟及避灾对策研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2010.
- [6] Doocy S, Daniels A, Packer C, et al. The human impact of earthquakes: a historical review of events 1980-2009 and systematic literature review[J]. PLoS Currents, 2013, 5.
- [7] Freer J, Beven K J, Neal J, et al. Flood risk and uncertainty[J]. 2013, 190-233.
- [8] Merz B, Thielen A H. Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis[J]. Journal of Hydrology, 2005, 309(1-4): 114-132.
- [9] 日本建筑防灾协会编写. 日本地下空间浸水时避难安全验证法试行案[M]. 2001.
- [10] 张炜. 地铁站在极端强降水事件时安全疏散的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50157-2013, 地铁设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 90-91.
- [12] 辛宁. 乘客行为对北京地铁大客流组织优化的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018..
- [13] 张强. 基于 AnyLogic 的某地铁站大客流组织及疏散研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.
- [14] 郝水清. 基于改进社会力模型的地铁站火灾应急疏散仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [15] 王秀丹. 基于行人运动特性分析的地铁站紧急疏散仿真[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.