

# 基于 AnyLogic 仿真的施工现场安全事故 应急疏散研究

刘 宁,刘文鑫,曲东澜

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要:**针对建筑施工现场安全事故损伤严重、应急疏散困难的问题,采用仿真模拟的研究方法可以有效优化施工现场应急疏散方案,提高应急管理人员疏散效率。首先,界定了施工现场的环境特性,并对影响疏散时间的参数进行了分析,给出了应急疏散时间标准;其次,应用仿真软件构建施工现场疏散模型,设置模型内的相应参数;再次,以某在建建筑为案例对象,针对施工总平面图布置和施工现场劳动力部署进行多次疏散模拟,得出了不同条件下的疏散时间及疏散人员密度图;最后,对模拟结果进行对比分析,得出了针对该项目的最优化劳动力部署及场地平面图布置。研究表明:在施工环境中应用仿真模拟技术可有效提高安全管理能力,优化施工现场应急疏散方案,降低事故发生的频率,提高疏散效率。

**关键词:**仿真模拟;施工现场;安全事故;应急疏散

**中图分类号:**TU714

**文献标志码:**A

建筑行业是我国经济发展的支柱产业之一,建筑安全生产是建设项目的核心指标,近些年来,频发的突发事故对我国安全管理提出了新的要求与挑战,同时也推动着我国安全管理的发展。

我国对于应急管理的研究可以概括为形成初期、被动发展期以及提升发展期3个阶段,现已取得了一定成绩。常春光等<sup>[1]</sup>归纳了应急管理过程中应急调度环节的各类模型与优化算法,指出了应急管理的发展趋势。李惠玲等<sup>[2]</sup>构建了安全管理成熟度评价指标体系,找出了应急管理的薄弱环节。但由于建筑施工现场环境复杂等原因,涉及建筑施工现场应急管理人员疏散的研究较少。

笔者对建筑施工现场安全事故的人员疏

散管理开展了系列研究,主要对施工现场总平面图布局进行优化,并根据实际案例建立疏散模型,应用仿真软件 AnyLogic 进行多次疏散模拟。AnyLogic 是一款应用广泛的模拟仿真软件,其人员仿真依托于行人库,通过行为流程图构建行人移动模型,能可视化反映突发事故应急疏散过程,快速计算疏散结果并得到相应的疏散数据。通过疏散仿真结果分析,仿真模拟技术能够优化施工现场平面布局,使安全事故发生时的安全疏散效率得到显著提高。

## 一、施工现场环境特性

施工现场的应急安全环境主要呈现出以下几种特性<sup>[3-6]</sup>:

1. 多风险的施工现场

施工现场临时设施多、现场功能结构复杂,普遍需要大量的模板及脚手架、作业平台等,存有较多易燃材料,如不能妥善布置现场结构平面,就会存在较大的安全隐患。

2. 多发性的地质灾害

建筑施工生产的特殊性主要体现在工期长(多数需要一年甚至更长时间)且多为露天作业,存在不可抗力,如地震、山体滑坡等自然灾害的隐患。

3. 多工种的施工人员

建筑施工包括建筑、结构、设备、电气等众多项目,与之相对应,完成各类项目的工种繁多。同时,我国的工程项目总承包多数采用 EPC 模式、EPCM 模式、D + B 模式,现场存在不同分包商,不利于统一管理,容易在应急疏散过程中发生冲突。

4. 多目标的生产要求

随着城市化进程不断加快,一些施工项目为达成生产目标,急于缩短工期、加快速度,在质量管理、安全管理检验方面并没有严格执行标准,存在安全隐患。

二、疏散参数分析

1. 应急疏散人群参数分析

Predtechenskii 等<sup>[7-8]</sup>研究密集人群的疏散行为,针对常态流、舒适流、紧急流 3 种不同人群的密度,给出了楼梯上行、下行和平直通道人流密度与移动速度之间的关系式(P & M 模型),并给出了紧急流速度增大系数。

(1) 疏散人群在平直通道上的移动速度

$$V_L = 1.867D_1^4 - 6.333D_1^3 + 7.233D_1^2 - 3.617D_1 + 0.95 \quad (1)$$

其中,  $D_1 = NA_p \div WL_s$ ,  $N$  为行走人流中的总人数;  $A_p$  为单个人的水平投影面积,  $m^2$ ;  $W$  为人流的宽度,  $m$ ;  $L_s$  为人流的长度,  $m$ 。适用范围为  $0 < D_1 \leq 0.92$ 。

(2) 疏散人群沿楼梯下行的移动速度

$$V_D = X_{down} \times V_L \quad (2)$$

式中:  $X_{down}$  为沿楼梯下行时的修正系数。

其表达式为

$$X_{down} = 0.755 + 0.44e^{-0.39D_{1down}} \times \sin(5.16D_{1down} - 0.224) \quad (3)$$

(3) 疏散人群沿楼梯上行的移动速度

$$V_U = X_{UP} \times V_L \quad (4)$$

式中:  $X_{UP}$  为沿楼梯上行时的修正系数。

其表达式为

$$X_{UP} = \begin{cases} 0.785 + 0.09e^{3.45D_{1UP}} \sin 15.7D_{1UP} \\ 0.785 - 0.10 \sin(7.85D_{1UP} + 1.57) \end{cases} \quad (5)$$

通常情况下,疏散人员在紧急疏散过程中心理压力较大,会导致疏散速度发生变化,需要应用速度增大系数  $u_1$  对常态流情况下的疏散速度进行修正。修正后的水平疏散速度  $V_1$ 、楼梯下行时的速度  $V_2$  分别为

$$V_1 = u_1 \times V_L \quad (6)$$

$$V_2 = u_1 \times V_D \quad (7)$$

式中:  $u_1 = 1.49 - 0.36D_1$ 。

2. 施工环境疏散速度修正

由于建筑施工现场环境的特殊性,施工现场存在大量的钢筋绑扎、混凝土浇筑、模板支护等区域,疏散人员在此类环境内进行疏散时,速度会受到障碍物的影响而发生变化,需要引进速度折减系数  $u_2$ , 对其进行修正,即

$$V_3 = u_2 \times V_1 \quad (8)$$

式中:  $u_2$  为施工环境导致的疏散速度变化的速度折减系数。

因施工现场存在大量的钢筋绑扎、模板支护和混凝土平面区域,故主要考虑这 3 种疏散环境的人流速度。在施工现场已经硬化部分(混凝土平面)的疏散可以近似于普通建筑物的疏散,故不需要考虑施工环境下的速度折减系数。笔者走访施工现场,随机抽取 20 名工人,不断调整人群密度,进行上述 3 种环境下 30 m 小跑的疏散测试,疏散的平均时间分别为 16.2 s, 18.9 s, 21.1 s, 经过计算,得到模板支护区域的疏散速度约为已硬化区域的 85.5%, 而钢筋绑扎区域的疏散速度约为已硬化区域的 77.3%, 故笔者将模板支护区域及钢筋绑扎区域的速度折减系数设置为  $u_{21} = 0.855$ ,  $u_{22} = 0.773$ 。

根据式(1)~式(8),设置施工现场疏散人群的移动速度,最小值为 0.848 m/s,最大值为 1.186 m/s,平均值为 0.988 m/s,其标准差为 1 m/s。

3. 应急疏散时间分析

施工现场突发事件种类较多,各类突发事件均会对现场建筑物造成不同程度的危害,影响疏散时间。突发事件对在建建筑的毁坏形式主要为建筑结构坍塌及火灾蔓延<sup>[9-10]</sup>,二者是危害面积最大的安全事故,需要重点防范。

以  $t_{AEST}$  表示突发事件对施工人员疏散构成危险的临界值,  $t_{REST}$  表示能够保证施工人员安全撤离作业面,到达安全区域所需的最短疏散时间值,故只有当  $t_{AEST}$  大于  $t_{REST}$  时,施工现场内施工人员才能安全疏散。

(1)  $t_{AEST}$

根据建筑施工现场的特性,可知建筑结构坍塌对施工人员生命安全构成最大威胁,施工现场大量的未成形结构构件容易遭到破坏,裸露在外的钢筋和模板极易突然塌陷,现场零散的成品、半成品以及临时设施、施工机械等随意堆放,经过长期积累,导致场地管理混乱、施工现场空间狭小,会对场内施工人员造成不同程度的危害。

根据国家现行标准《建筑设计防火规范》GB 50016—2014(2018 版)对消防安全疏散的规定,高层建筑的疏散时间通常按照 5~7 min 标准,笔者考虑施工现场条件特殊,建筑物易于发生二次事故,故将其疏散时间标准设置为 5 min,即 300 s。

(2)  $t_{REST}$

依据《建筑设计防火规范》GB 50016—

2014(2018 版),安全疏散时间包括报警铃警报时间  $t_a$ 、疏散前准备时间  $t_{pre}$  及疏散行动时间  $t_{act}$ ,可得所需安全疏散时间的关系式为

$$t_{REST} = t_a + t_{pre} + t_{act} \tag{9}$$

考虑最不利情况,设置施工现场报警铃警报时间  $t_a$  为 5 s。施工现场工作人员发现突发事件并做出疏散行为的动作之间存在一个反应时间,即疏散前准备时间  $t_{pre}$ 。由于工程项目施工现场的特殊性,施工现场要制定合理有效的工程项目现场安全管理制度,做好进场前的安全教育与培训工作,使施工人员在应对突发事件时能更快地进入应急疏散状态,以便降低事故所造成的危害,故将疏散前准备时间设定为 3 s。施工人员从作业面到安全区域的疏散行动时间  $t_{act}$  可以通过仿真模拟过程得到。

三、施工现场疏散模型

1. 施工现场首层疏散模型

根据仿真软件 AnyLogic 的应用规则,利用行人库构建施工现场疏散模型,并设置不同人员疏散行为参数。建筑施工现场包括场内在建建筑、场内生活区以及场内办公区。项目经理部成员主要分布在施工现场,依据其各自工作职责及工作内容,在工作期间在施工现场进行巡视,并每日到会议室总结工作。场内生活区包括工人宿舍、厕所、厨房以及食堂。另外,位于场内办公区的资料室工作人员需全天候在岗,以便于现场施工人员随时前来咨询。利用 AnyLogic 软件中时间表模块为场内人员设置工作时间,相应信息如表 1 所示。

表 1 相应工作人员工作信息

工种	工作时间	主要工作区域
管理人员	7:30 - 12:00;13:30 - 18:00	场内办公区、施工现场
施工人员	8:00 - 12:00;13:30 - 18:00	施工现场
后勤人员	6:30 - 8:30;11:00 - 13:00;15:00 - 18:30	场内生活区(食堂、厨房、宿舍、厕所)
机动人员	8:00 - 12:00;13:30 - 17:30	施工现场

以现场施工人员为例,进行具体分析。以 Ped Source 模块设置仿真模型中人员的生成情况;以 Ped Select Output 模块设置模型

中不同工人的工作行为情况,可设置 2~5 个出口,反映员工的不同行为路径;还可以利用 Ped Wait 模块控制其在施工现场施工、利用

Ped Go To 模块控制其前往食堂就餐和利用 Ped Service 模块控制其前往办公区汇报工作等。场内逻辑如图 1 所示,虚线表示突发事件时场内的逻辑路线。

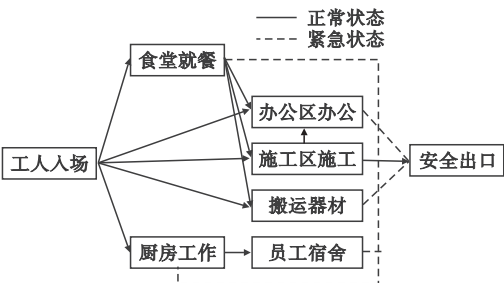


图1 场内局部运行逻辑

2. 施工现场内在建建筑多层疏散模型

主要介绍建筑模型二层、三层的构建,其人员类型为场内施工人员。由于 AnyLogic 软件不具备楼梯的三维模型搭建功能,为使疏散模拟更直观、真实,需以最为接近楼梯台阶的矩形进行绘制。结合在建建筑比例关系,根据层高、梯段长度设置梯面、踏面宽度和高度。设置单个梯段构件的参数后,使用“值编辑器”功能,键入代码使梯段有序上升(见图2)。

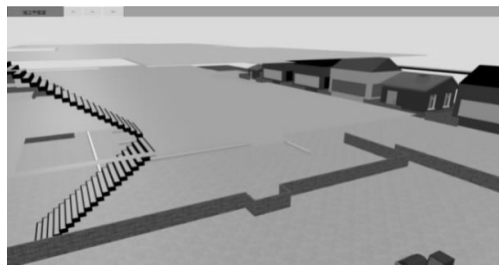


图2 多层建筑模型效果

根据 AnyLogic 软件规则,利用 Ped Ground Change 功能及 Ped Area Descriptor 功能,使智能体识别斜地面并沿斜地面匀速移动,模拟施工人员在楼梯上的行动过程。

3. 紧急疏散设置

拖入一个按钮模块,用作突发事件时间节点,模拟应急疏散过程。利用函数模块为场内人员设置疏散路径,在人员流动特性下设置最短路径函数,即突发事件条件下,场内人员优先选择距离最近的出口进行疏散。

四、优化模型运行结果

1. 疏散模型模拟运行

选取某公寓建筑项目进行施工现场突发事件应急疏散研究,项目共设置 5 个安全出口,在建建筑中自二层通往三层的楼梯共 2 个,重大事故发生时,二层和三层的作业人员只能通过楼梯行至一层后由施工现场内各安全出口进行疏散,该施工现场空间结构平面如图 3 所示。



图3 场内空间结构平面

通过实验观测,人员流动状况模型能够有效模拟该建筑现场一天内的人员流动情况。该项目的仿真模拟设置不同的人员配置方案,开放不同数量的紧急出口。疏散人员主要分布于办公区、生活区、建筑施工平面以及建筑物内多个作业面,依据其特定的时间表及工作特性进行安排,通过疏散过程检验该模型的合理性,进而对施工现场平面布置及场内人员配置优化情况进行对比分析。

(1) 施工工作阶段模拟

选取 6:00 作为疏散仿真的开始时间,施工现场各工种人员正常作业。利用行人库中行人密度图模块,检验该项目在不同功能点的行人密度,并依据行人密度进行安全管理优化。其施工阶段模拟运行效果如图 4 ~ 图 6 所示。

(2) 突发事件应急疏散模拟

选取 14:00 为场内突发事件时间点,此时场内劳动力总人数达到峰值,为仿真最不利点。现场事故突发时,安全警报铃立即进入工作状态,施工场内工作人员开始应急疏



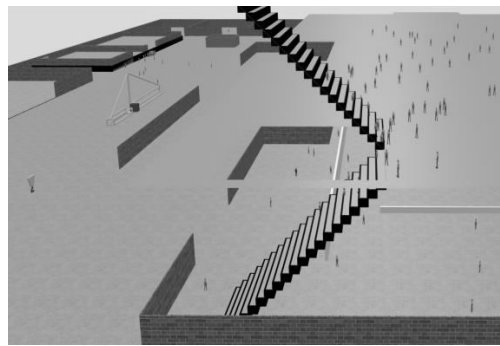


图 4 施工区域模拟运行效果

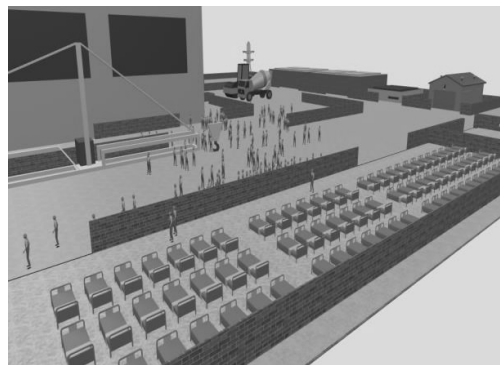


图 5 生活区域模拟运行效果

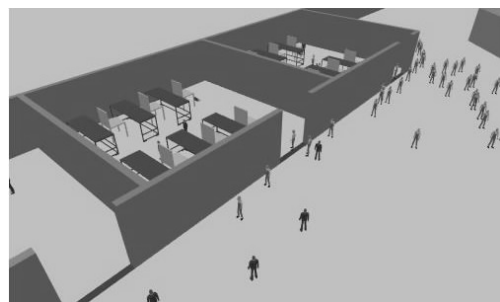


图 6 办公区域模拟运行效果

散。警报铃响,即打开紧急出口供场内人员应急疏散使用,疏散人员优先选取距离最近的出口进行应急疏散。

由于本项目占地面积较大,建筑场内共设置 5 个紧急出口,开放不同的紧急出口,便于研究不同出口的利用率及疏散不利点的分布情况。

2. 施工人员数量对疏散效果的影响

施工现场疏散总人数对应急疏散总时间存在着直接作用效果。从相应参数分析来看,场内疏散总人数越多,后疏散的疏散人群能够安全疏散的可能性越低;场内疏散人群的数量增多会使人群众集程度加大,导致移

动速度降低,进而影响疏散效率;场内疏散人员较多,受紧张、冲动等心理因素影响,极易在紧急出口或道路较为狭窄处发生拥挤、堵塞等情况,导致疏散过程停滞不前。笔者利用 AnyLogic 软件对改变场内疏散人数及可应用紧急出口组合的情况进行仿真模拟,记录安全疏散所需的时间(见图 7、图 8)。

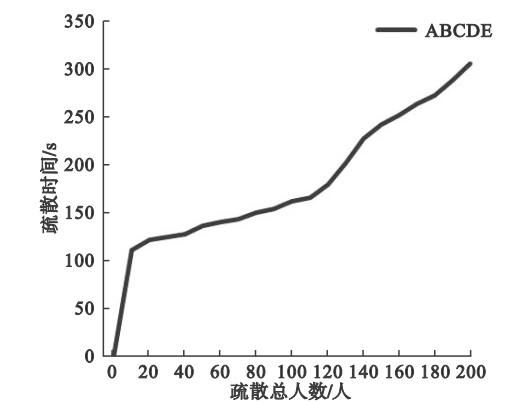


图 7 开放 5 个出口疏散情况

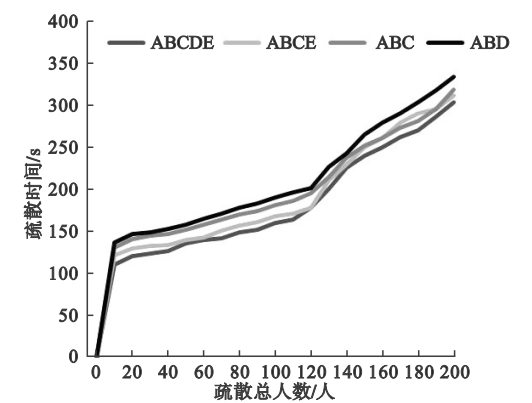


图 8 整体疏散时间对比分析

由图 7、图 8 可知:

- ①施工现场突发事故应急疏散时间随场内疏散总人数的增加而不断增大;
- ②受场内人员分布随机性的影响,施工现场突发事故应急疏散时间与场内疏散总人数并不呈线性关系,但可以根据场内疏散总人数和回归线的趋势粗略地估算施工场内突发事故应急疏散时间;
- ③当施工场内疏散总人数超过 130 人时,疏散时间 - 疏散总人数曲线的斜率呈阶段性上升。通过疏散模拟动画,可以观察到由于处于在建建筑内的人员较多,疏散人员在下楼梯离开在建建筑时出现了拥堵、停滞

的现象,对整体疏散过程造成了较为严重的影响,导致疏散效率降低、疏散时间增加。对此,施工单位在编制该工程的施工组织计划书时,应尽可能控制在建建筑内的人员数量,将人数尽可能限制在130人之内;

④分别开放D、E出口对总体疏散时间的影响不大,而当疏散人数逐渐增多时,C出口对总体疏散时间的影响较大,因此,当总疏散人数达到110人以上时,必须开放C出口,否则会造成疏散出口拥堵,延误疏散时间;

⑤开放5个安全出口的情况下,该项目所能保证场内人员安全疏散的临界疏散时间为194.66 s;根据该曲线可以估算出该工程能保证安全应急疏散的最大疏散人群约为110人,要依据这些数据对劳动力需求量计划进行相应调整。

此外,突发事故人员疏散会因从众、紧张等心理影响,导致人员无法从最近的安全出口进行疏散,应组织相应的入场前安全培训及演练,以降低事故发生时的伤亡率。

3. 施工平面布置对疏散效果的影响

施工场内的突发事故通常要求场内人员快速实施疏散行为,以免遭受二次事故的伤害,因此,对疏散时限要求严格。由于建筑施工现场生产的特殊性,施工现场存在大量的临时设备(如混凝土搅拌站、砂浆搅拌站、水池等),会成为疏散过程中疏散行为的障碍物,在一定程度上影响场内人员对最短疏散路径的选择。模型运行时发现,场内的混凝土搅拌站及大型器具等均会阻碍场内人群疏散,场内施工人员必须绕过此类临时建筑。同时发现,在建建筑内施工人员较多,但只有一个楼梯通向外界,对应急疏散造成很大影响。而当施工现场突发事故时,避难是非常紧迫的,要求施工人员必须快速找到疏散通道,由最短距离行进。因此,在这个前提下,施工场内的临时设备、大型机具停靠摆放位置应尽可能靠边安置或集中安置,避免阻挡场内施工人员疏散通道;在建建筑应设置两个以上楼梯及应对突发状况的临时疏散通道,

一旦发生事故,就尽可能快速地进行疏散。

为检验优化结果,分别对优化前后的两种施工现场平面布置方案进行疏散仿真模拟。设置相同参数,优化前场内人员完全疏散时间为332 s,而调整场内临时设备的摆放位置后,场内人员完全疏散时间为293 s,相较于优化前减少了约11.7%。通过观察上述两种场地布置情况下的疏散模拟动画,可以发现调整后疏散过程中场内人员能更顺利地到达紧急出口,减少绕行,提高了安全疏散的效率。

由场内人员疏散密度图(见图9、图10)可以观测到实施疏散行为时的路径拥堵点,红色区域表示疏散过程中存在拥堵,应适当扩宽疏散路径,疏导场内人员疏散,降低事故伤亡率。

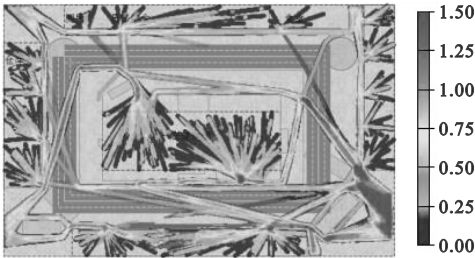


图9 优化前人群密度

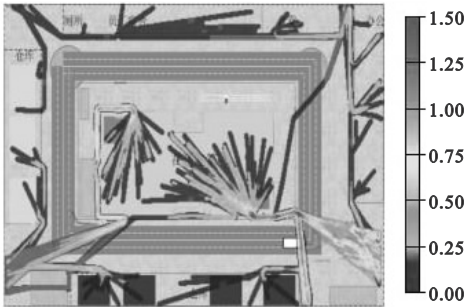


图10 优化后人群密度

五、结 语

将仿真模拟技术引入施工现场安全管理,能有效提高工程项目管理的安全管理水平,降低施工现场突发事故的危险性,增加现场突发事故安全疏散的可能性。笔者以某项目工程为例,针对突发事故下人员安全疏散问题,利用 AnyLogic 软件进行安全疏散模

拟,以充分发挥安全出口功能,实现重大突发事件发生后迅速安全疏散的目标,并将得出的结论反馈到该项目的工程管理中,对其施工组织设计提出合理有效的优化建议。

参考文献:

[1] 常春光,陈冬文,宋晓宇. 突发事件应急调度模型与管理评价指标体系述评[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2009,11(2):178 - 181.

[2] 李惠玲,刘航天,李晓琴. 高层建筑施工安全管理成熟度评价研究[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2013,15(4):386 - 392.

[3] 张维胜. 基于 BIM 技术的高层建筑施工安全管理研究[J]. 建设科技,2017(8):104 - 105.

[4] 付聪,赵啸. 建筑安全事故关键影响因素研究[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版),2014,16(增刊2):91 - 93.

[5] 方东平,张剑,黄吉欣. 建筑安全管理的目标和手段[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版),2005,20(1):86 - 90.

[6] 郝生跃,柴正兴. 完善我国建筑安全管理组织体系的思考[J]. 中国软科学,2006(6):13 - 19.

[7] PREDECHENSLII V M, MILINSKII A I. Planning for foot traffic flow in buildings[M]. New Delhi: Amerind Publishing Company, 1978.

[8] 褚冬竹,魏书祥. 城市公共空间人群涌现现象、机理及意义:关于高密人流区域“行为 - 时空 - 安全”关联性研究[J]. 建筑学报,2018(8):40 - 45.

[9] 袁媛,汪定伟. 灾害扩散实时影响下的应急疏散路径选择模型[J]. 系统仿真学报,2008(6):1563 - 1566.

[10] 杨建芳,高岩,李丽花. 多出口建筑物突发事件应急疏散模型和算法[J]. 系统工程理论与实践,2011,31(增刊1):147 - 153.

# Simulation Study on Emergency Evacuation of Major Accidents at Construction Site Based on AnyLogic

LIU Ning, LIU Wenxin, QU Donglan  
(School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** In terms of the serious accidents at the construction site and the difficulty of emergency evacuation, the simulation research method can effectively optimize the emergency evacuation plan at the construction site and improve the evacuation efficiency of emergency management personnel. Firstly, the environmental characteristics of the construction site and the parameters affecting the evacuation time are defined, and the time standard of emergency evacuation is given. Secondly, the application simulation software is used to construct the construction site evacuation model, and the corresponding parameters and emergency evacuation conditions in the model are set. Thirdly, selecting a building under construction as a case object, carrying out multiple evacuation simulations for the layout of the general construction plan and the optimal labor deployment of the construction site, the evacuation time under different conditions and the density map of the evacuated personnel can be obtained. Finally, through the comparative analysis of the simulation results, the optimal labor deployment and site plan layout for the project can be obtained. The research results show that the application of simulation technology in the construction environment can effectively improve the safety management ability, optimize the emergency evacuation plan at the construction site, reduce frequency of accident occurrence and improve evacuation efficiency.

**Key words:** simulation; construction site; safety accident; emergency evacuation

(责任编辑:郝 雪 英文审校:林 昊)