

George C. Marshall Space Flight Center. 1965.
[3] HARDEE H C, LEE D O. Thermal hazard from propane fireballs [J]. *Transportation Planning and Technology*, 1973, 2: 121-133.
[4] FAY J A, LEWIS D H. Unsteady burning of unconfined fuel vapor clouds [J]. *Combustion*, 1977, 16: 1397-1403.
[5] ROBERTS A F. Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurized storage [J]. *Fire Safety Journal*, 1982, 4: 197-212.
[6] MARTINSEN W E, MARX J D. An improved model for the prediction of radiant heat flux from fireball [C] // *Proceedings of CCPS International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials*. San Francisco, California: September 28 - October 1, 1999; 605-621.
[7] JOHNSON D M, PRITCHARD M J, WICKENS M J. *Large scale catastrophic release of flammable liquids*. EV 4T.0014 [R]. UK (H): Commission of the European Communities, 1990.
[8] PARK K, MANNAN M S, JO Y D, et al. Incident analysis of Bucheon LPG filling station pool fire and BLEVE [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(1): 62-67.
[9] CCPS/AIChE. *Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases* [M]. New York: Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, 1999.
[10] CRAWLEY F K. The effect of ignition of a major fuel spillage [C] // Institution of Chemical. *The assessment of major hazards: proceedings of Engineers Symposium Series No. 71*. Oxford: Pergamon Press, 1985; 125-145.
[11] TNO. *Methods for the calculation of physical effects* [M]. Hague, Netherlands: Yellow Book Committee for the Prevention of Disasters, 1997.
[12] LIU Mao (刘茂), YU Sulin (余素林), LI Xueliang (李学良), et al. Analysis of consequences of flash fire [J]. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2001, 1(4): 28-31.
[13] LIU Mao (刘茂), DONG Zhao (董昭), YU Sulin (余素林), et al. Risk analysis of freeway propane tanker explosion [J]. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2002, 2(5): 6-8.
[14] PRUGH R W. Quantitative evaluation of fireball hazards [J]. *Process Safety Progress*, 1994, 13(2): 83-91.

On the dynamic model application to the fireball radiation consequence calculation

ZHANG Dong-li, LIU Mao, WANG Wei, LI Jiang-feng
(Urban Public Safety Research Center, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The paper is aimed to present the author's study on how to apply the dynamic model to the fireball radiation consequence calculation. As is known, boiled-liquid expanding vapor explosion (BLEVE) is likely to take place when a sudden loss of containment of a highly pressurized vessel with superheated flammable liquids. The thermal radiation emitted by the resulted fireball is extremely intensive with the great potential to cause severe health-damage even human casualty as well as other kinds of material damage. In order to predict the radiant heat effects of fireballs more accurately, this paper has done a deep-going study of personnel injuries that would be caused by the exposure to a BLEVE fireball. In doing so, the paper has introduced a dynamic model based on the time-varying behavior of fireballs while describing the time-dependent characteristics of the parameters of the fireball, for example, its diameter, height and thermal flux at a target by means of a simple case study. In comparison with the static fireball models, our research results show that the dynamic model can help to describe the time-dependent features of the fireball parameters more truthfully. In so doing, it is also possible to further provides more realistic estimates of the extent of potentially damaging or injuring radiant thermo-hazard zones that are likely to suffer the disastrous consequences caused by the fireballs. Therefore, it can be proved that the dynamic model we suggest here is by nature an effective theoretical one if it can be properly applied to the fireball radiation consequence calculation. It can also be applied in case we conduct a safety design or risk analysis of a storage tank holding superheated inflammable liquid.

Key words: safety engineering; fireball; radiation; dynamic model;
CLC number: X913.1 **Document code:** A
Article ID: 1009-6094(2007)03-0132-04

文章编号: 1009-6094(2007)04-0135-04

人群密度对人群拥挤事故的影响^{*}

冉丽君, 刘 茂
(南开大学城市公共安全研究中心, 天津 300071)

摘 要: 为了研究公共场所的人群密度与拥挤事故的发生概率。基于连续人群流动模型, 从人群密度角度探讨了人群拥挤事故发生的机理。由于不同民族个体生理尺寸的差异, 人群最大忍受密度不同, 以此作为判断人群拥挤事故的标准, 并结合我国情况提出我国人群最大忍受密度为 9 人/m²。最后模拟了某个拥挤事故场景, 用该模型对其进行拥挤事故分析。结果表明, 连续人群流动模型可以用于预测拥挤事故的发生, 对预防和控制人群拥挤事故具有一定的指导意义。

关键词: 安全管理工程; 人群拥挤; 事故; 人群密度; 连续人群流动模型

中图分类号: X928.03 文献标识码: A

0 引 言

近年来, 随着社会生活水平的提高, 公共场所人群聚集活动日益增加, 导致人群拥挤事故增多, 而且事故频率呈现逐年增加的趋势, 造成十分严重的人员伤亡和财产损失。公共场所人群聚集的安全问题日益突出。在公共场所发生人群拥挤事故是非常危险的, 特别是在空间有限、人群相对集中的场所, 如球场、商场、公园、庙会、宗教朝圣的仪式上等。2000 年 7 月, 丹麦一场音乐会发生拥挤事故, 造成 26 人受伤, 9 人死亡; 2004 年 2 月 5 日, 北京密云举行灯展, 由于人群过度拥挤, 造成 37 人死亡, 15 人受伤; 2005 年 1 月 22 日, 麦加姆尼耶圣地在投石避邪桥一带发生朝觐者严重拥挤事故, 致使约 500 名朝觐者受伤。由此可见, 研究如何避免人群拥挤事故的发生是大型社会活动顺利组织并举行的安全保障, 具有重要的社会意义和实际价值。2008 年我国将在北京举办奥运会, 2010 年将在上海举办世界博览会, 届时会出现大量的人群聚集现象, 公共场所人群聚集的安全问题已经成为我国关注的焦点。

国内对人群聚集安全的研究主要集中在建筑安全方面, 重点研究发生紧急事故时的人群疏散问题, 如中国科学技术大学采用 Helbing 的元胞自动机模型模拟出口宽度、厚度和人员期望速度对疏散时间的影响^[1]; 南开大学城市公共安全研究中心采用 SCM 对建筑出口风险的研究^[2]。但对人群聚集的研究不能仅停留在建筑安全的角度, 应扩大到大范围空间内公共场所中的人群聚集, 如广场、公园等。任常兴等对城市公共场所人群拥挤踩踏事故进行了分析^[3], 但主要采用的是建立指标体系的方法。本文针对此类公共场所, 采用数学模型揭示拥挤事故发生的机理。

有关人群聚集的灾害事故说明, 人群高度聚集存在较高风险, 甚至危及生命。事故通常可以分为两类, 即踩踏事故和

^{*} 收稿日期: 2007-01-26
作者简介: 冉丽君, 硕士研究生, 从事安全工程与技术研究; 刘茂 (通讯作者), 教授, 博士生导师, 从事安全工程与技术研究。
基金项目: 国家自然科学基金项目“奥运会公共风险分析及安全管理系统的研究” (70373031)

拥挤事故。在踩踏事故中, 人群密度很高, 但人群仍可以运动, 一旦产生触发因素(如有人摔倒), 就会导致事故发生; 拥挤事故中, 人群密度非常高, 人群几乎无法运动, 通常由于相互挤压导致窒息死亡。当拥挤发生时, 由于人群密度很高, 人与人之间相互挤压, 对身体产生很大压力。Wertheimer (2000) 指出, 一旦人群密度超过了临界值, 人群就处在风险中, 因此人群密度决定了人群是否存在风险^[4], 人群密度由人群的个体生理尺寸决定。

本文首先以人群聚集心理和运动规律为基础, 研究人群密度对聚集风险的影响, 然后根据澳大利亚 Hughes 提出的连续人群流动模型预测拥挤事故, 最后结合我国情况设定某个人群聚集的拥挤场景, 利用该模型对其进行拥挤事故分析。

1 人群拥挤特征

Canetti (2000)^[5] 认为, 公共场所人群聚集时, 个人行为由于受周围人群影响较大, 导致其外部行为很强, 群体行为会影响个人行为, 即人群具有与个体不同的从众心理。在人群密度比较低时, 人群为自由流动, 不是连续流动, 不会发生拥挤事故; 当人群密度较大, 造成人群拥挤时, 受从众心理影响, 可以将人群视为连续流动, 因此研究拥挤事故时可以将人群看作一个整体。

人群聚集时受人群运动规律影响, 当人群运动有共同的目标时称为行为理论(action theory)^[6]。在行为理论中, 人群运动目标明确, 如参加大型体育赛事时, 人群清楚地知道自己的目标及其所在地, 人群行为可以用流体力学工程原理建立模型。

人群中个体向目标运动, 但是由于人群密度比较大, 运动可能会受到其他人的阻碍, 受阻后他们会试图穿过前面的人, 两者之间就会产生相互作用力。人群中的这种作用力通过人群与地面的剪切力进行平衡。人群之间的作用力导致人群内部产生压力。由于内部压力, 人群无法正常呼吸, 就会造成部分人群窒息致死。正常情况下, 健康成人肺的基本容量(经过深呼吸之后呼入的最大气体体积)约为 4 000~5 000 mL^[7], 可以忍受施加在胸腔上的压力一般为 20~30 kPa, 但这个压力值与年龄、性别及健康程度等有关。人群的内部压力是判定人群发生拥挤事故的重要标准, 由于人群密度决定人群内部压力, 因此在无法测量人群内部压力的情况下, 通常采用人群密度判定人群是否会发生拥挤事故。

人群密度反映了一个空间内人员的稠密程度, 通常用单位面积上分布的人员数目表示。一般情况下, 最大人群密度是 7 人/m² 或 8 人/m², 这主要取决于组成人群的个体生理尺寸。发生拥挤事故时, 最大人群密度有时可以达到 13 人/m² 或 15 人/m²。根据文献^[8,9], 个体的最大生理尺寸通常由肩宽 b_p 和身体厚度 d_p 决定。为便于计算, 将个体抽象成椭圆形或矩形区域, 个体所占面积采用下列公式计算。表 1 给出了不同地区人群生理尺寸数据^[8,9]。

$$SpE=\frac{\pi}{4}b_p d_p \tag{1}$$

$$SpS=b_p d_p \tag{2}$$

综合考虑我国人口情况, 兼顾计算需要, 本文取 $b_p=0.5\text{ m}$, $d_p=0.25\text{ m}$, 则 $SpE=0.098\text{ m}^2$, $SpS=0.125\text{ m}^2$, 取二者的平均值得到我国人群最大忍受密度为 $\rho_{risk}=9\text{ 人/m}^2$, 以此密

度作为我国拥挤场景下发生事故的判断标准。

2 连续人群流动模型

1995 年, Lighthill 和 Whitham 提出运动波理论, 用于解释车流中观察到的各种流动特征^[10]。拥挤事故中人群运动也存在类似于车流运动的行为规则。2002 年, 澳大利亚的 Hughes^[11] 将该理论应用于人群聚集现象, 根据人群运动规律和从众心理, 建立了连续人群流动模型。该模型是一组关于行人密度和速度的非线性偏微分方程, 在不同的空间区域得出事故的临界点, 为预测人群拥挤事故提供了理论依据。

该模型认为, 在人群密度较高情况下, 人群运动符合连续人群流动理论, 类似于流体中的连续流动方程, 式(3)是连续人群流动守恒方程。行人速度是周围人群密度和运动特征的函数, (u, v) 由式(4)给出; 行人运动有一定的速度势能, 由速度 (u, v) 定义, 行人总是努力改变现有的势能, 因此行人的运动都在与现有等势线相垂直的方向上, 得到关于方向余弦的式(5); 由于人群运动总是选择最佳路径, 既避免人群密度高的地方又选择最短路径, 即运动时间和速度的乘积最小, 因此两条等势线间的距离与行人速度成比例, 而与行人选择的路径无关, 从而得到式(6)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u \rho}{\partial x} + \frac{\partial v \rho}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

$$u=f(\rho)\phi_x; \quad v=f(\rho)\phi_y \tag{4}$$

$$\phi_x=\frac{-(\partial \phi/\partial x)}{\sqrt{(\partial \phi/\partial x)^2+(\partial \phi/\partial y)^2}},$$
$$\phi_y=\frac{-(\partial \phi/\partial y)}{\sqrt{(\partial \phi/\partial x)^2+(\partial \phi/\partial y)^2}} \tag{5}$$

$$\frac{1}{\sqrt{(\partial \phi/\partial x)^2+(\partial \phi/\partial y)^2}}=g(\rho)\sqrt{u^2+v^2} \tag{6}$$

其中 ρ 表示人群密度; u 和 v 表示 (x, y) 坐标的速度; t 表示时间; ϕ_x 和 ϕ_y 表示运动方向的余弦; $f(\rho)$ 表示速度, 是以密度为自变量的函数, $f(\rho)=0$ 表示人群运动速度为 0; $g(\rho)$ 表示人群舒适度, 通常情况下取 1。

在式(3)~(6)的基础上, 推导得到最终运动方程^[12]。

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\rho g(\rho)f^2(\rho)\frac{\partial \phi}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\rho g(\rho)f^2(\rho)\frac{\partial \phi}{\partial y}\right] = 0 \tag{7}$$

$$g(\rho)f(\rho)=\frac{1}{\sqrt{(\frac{\partial \phi}{\partial x})^2+(\frac{\partial \phi}{\partial y})^2}} \tag{8}$$

表 1 不同地区人群生理尺寸数据
Table 1 Body size in different countries

国家(地区)		肩宽 b_p/m	身体厚度 d_p/m	椭圆面积 SpE/m^2	矩形面积 SpS/m^2
英国	男	0.510 0	0.285 0	0.114 2	0.145 4
	女	0.435 0	0.295 0	0.100 8	0.128 3
日本	男	0.475 0	0.230 0	0.085 8	0.109 3
	女	0.425 0	0.235 0	0.078 5	0.099 9
美国	男	0.515 0	0.280 0	0.113 3	0.144 2
	女	0.470 0	0.295 0	0.108 9	0.138 7
印度	男	0.455 0	0.235 0	0.084 0	0.106 9
	女	0.390 0	0.255 0	0.078 1	0.099 5
平均		0.459 3	0.263 75	0.0954 5	0.121 5

最终运动方程适用于多种类型的人群拥挤情况。

对于有共同运动目标和运动特征的单一类型人群, 运动方程可以写为如下形式。

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = S \cdot [f(\rho) - (u^2 + v^2)^{1/2}] \phi_x;$$
$$\frac{\partial \rho}{\partial y} = S \cdot [f(\rho) - (u^2 + v^2)^{1/2}] \phi_y$$
$$\phi_x^2 + \phi_y^2 = 1$$

(9)

(10)

式(9)中, $f(\rho) - (u^2 + v^2)^{1/2}$ 表示期望速度和实际速度的差异, 这种差异是由人群之间的相互作用力产生的, 式子的左边表示人群之间的净作用力, S 表示比例常数, 取值与最大人群忍受密度有关。式(10)表示方向余弦的平方和为 1。

人群运动速度与密度有关。当密度几乎为零的时候, 人群流动几乎也为零, 但人群以最大速度运动; 随着密度的增加, 人群速度降低, 人群流动增加; 当密度达到临界密度时, 人群流动达到最大值; 随着密度的进一步增加, 人群流动减小, 直到密度达到最大人群密度时, 人群流动速度为零。到目前为止, 还没有一个统一的函数关系式可以表示一般情况下的人群速度与密度的关系。根据目前的研究结果, 人群运动速度和密度的关系主要应用以下公式^[11-13]。

$$f1(\rho) = A - B\rho$$
$$f2(\rho) = A \exp(-\rho/\rho_{crit})$$
$$f3(\rho) = A \left[\frac{\rho_{tran}\rho_{crit}}{\rho_{max} - \rho_{crit}} \right]^{1/2} \frac{(\rho_{max} - \rho)^{1/2}}{\rho}$$

(11)

(12)

(13)

其中 ρ_{tran} 表示人群运动速度减小时的人群密度, ρ_{crit} 表示人群临界密度, 即人群流量达到最大时对应的人群密度; ρ_{max} 表示人群最大密度, 即人群运动速度为零时对应的人群密度。 A 表示高度自由行走速度, B 为常数。这些参数的取值都与人群的年龄、身高、体重及行为特征有关。一般情况下, $A=1.4\text{ m/s}$, $B=0.25\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{s})$, $\rho_{tran}=0.8\text{ 人/m}^2$, $\rho_{crit}=A/2B=2.8\text{ 人/m}^2$, $\rho_{max}=A/B=5.6\text{ 人/m}^2$ ^[11-13]。

根据式(11)~(13)绘出的图形见图 1。可以看出, 式(11)和(13)不适用于高密度下的人群拥挤分析, 式(12)可以用于密度非常高的情况, 适用于分析人群拥挤事故, 因此本文计算人群拥挤事故时采用式(12)。

3 案例分析

假设某公共场所举行大型活动, 如露天表演。人们为了更好地观看表演, 纷纷涌向靠近表演场地区域。场地内人数共约 1 400 人, 场地面积为 180 m²。由于参加人数过多, 人群过于拥挤, 人群之间相互挤压, 引发人群拥挤事故, 造成数人

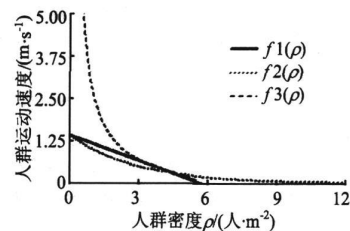


图 1 人群密度与速度关系图

Fig. 1 Relation between density and velocity based on the three equations

死亡。事故现场情况见图 2。为了安全起见, 观众与表演场地之间设有挡板。为便于计算, 将图中观众聚集场地划分为 18 个区域, 每个区域面积为 10 m²。下面利用上述连续人群流动模型对该场景的人群密度进行预测, 用于分析拥挤事故是否会发生。

根据图 2, 将事故地点视为半圆形, 则直角坐标系下的式(9)变成用极坐标系表示的式(14)

$$-\frac{d\rho}{dr} = Sf(\rho)$$

(14)

其中 r 为半径, 是不同划分区域中点到其目标(表演场地中心)的距离, m。

将式(12)带入式(14), 得到式(15)

$$\rho = \rho_{crit} \ln \left(C - \frac{ASr}{\rho_{crit}} \right)$$

(15)

其中 C 和 S 为常数。Ris S C Lee 等^[14]采用该模型对 2000 年丹麦音乐会事故和 1989 年英国 Hillsborough 赛场事故进行分析时提出, 当 $\rho_{risk}=7.42\text{ 人/m}^2$ 时, C 取值约为 20, S 约为 1 s/m^4 ; $\rho_{risk}=8.76\text{ 人/m}^2$ 时, C 取值约为 35, S 约为 4 s/m^4 。根据我国人群特点 $\rho_{risk}=9\text{ 人/m}^2$, 选取 C 值约为 40, S 约为 4 s/m^4 。

由于事故地点是对称的, 10 和 7 部分的距离相同, 其他同理。根据图 2 合理假设其中每一部分的距离 r , 具体见表 2。

利用式(15)计算得到发生事故时不同区域的人群密度, 见图 3。图 4 表示密度随距离 r 的变化, 由于拥挤现场对称, 图 3 只表示右半部分(1—9)的情况。

根据图 3 和 4 得知, 7 和 10 部分人群密度最大, 为 9.33 人/m^2 , 是该场景中最危险的部分。由于我国发生拥挤事故的最大忍受人群密度为 $\rho_{max}=9\text{ 人/m}^2$, 7 和 10 部分的人群密度超过了我国最大人群忍受密度, 因此此场景会发生人群拥挤事故, 并且事故在 7 和 10 处最危险区域造成数人死亡。从图 4 中可以看到, 距离场地越近的区域, 较远区域人群不断拥挤向前, 密度较其他区域更容易超过最大人群密度忍受, 是拥挤事故易发区域。

假设 7 和 10 处最危险区域人群密度为最大忍受人群密度为 $\rho_{max}=9\text{ 人/m}^2$, 根据该连续人群流动模型计算得出其他

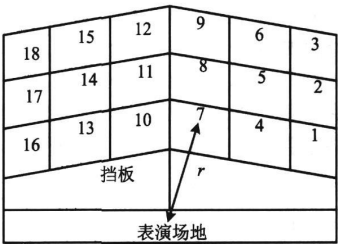


图 2 拥挤事故现场平面图

Fig. 2 Site drawing of crowd accident

表 2 不同位置的半径

Table 2 The radius of different positions									
位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9
半径/m	16	17	18	13	14	15	10	11	12

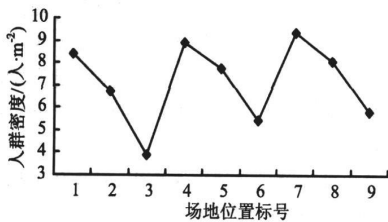


图 3 人群密度和位置的关系
Fig. 3 Relation between density and position

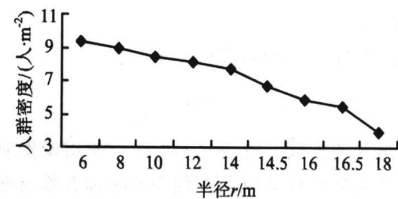


图 4 人群密度随半径的变化
Fig. 4 Variety of density with r

区域的人群密度,乘以各区域面积最后得出该场地内最多可容纳的人数约为 1 200 人,而实际容纳人数约为 1 400 人,超过了可容纳人数,造成人群过度拥挤。故活动组织者应加强对进场人数的控制,并应加强类似该场景中 7 和 10 处最危险区域的人群管理,防止拥挤事故发生。

4 结 论

本文主要研究了高密度的人群拥挤事故,利用澳大利亚 Hughes 提出的连续人群流动模型进行了分析。结果表明,该模型适用于人群拥挤事故分析,为预测人群拥挤事故的发生提供了理论依据。

人群拥挤事故发生在超过人群最大忍受密度的区域,由于各民族的人体生理尺寸不同,可以忍受的最大密度不同,根据我国人群特点确定我国的人群最大忍受密度标准为 $\rho_{\max}=9\text{人}/\text{m}^2$ 。

从案例分析可知,拥挤事故主要发生在距离人群目标最近的区域,应加强对此类区域的人群管理。对于大型集会等,应对人群人数和密度进行实时监控,采取及时有效的措施控制后面人群向前拥挤,减缓前面人群的压力,避免由于过度拥挤造成人群密度超过最大可以忍受密度,防止拥挤事故发生。

此外,人群拥挤事故有很多不确定因素,本文仅以人群密度作为拥挤事故发生的主要判断依据,还需要对拥挤环境、事故触发因素等进行进一步的研究,为人群聚集事件中的安全问题提供更多依据。

References(参考文献):

[1] SONG Weiguo(宋卫国), YU Yanfei(于彦飞), CHEN Tao(陈涛). Influences of exit conditions on pedestrian evacuation[J]. *Fire Safety Science* 2003, 12(2): 100-104.
[2] ZHANG Qingsong, LIU Mao, WU Caihong, et al. A stranded-crowd model (SCM) for performance-based design of stadium egress[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(7): 2630-2636.
[3] REN Changxing(任常兴), WU Zhongzhi(吴宗之), LIU Mao(刘茂). Analysis of accident due to swarm and jostlement at urban public place[J]. *China Safety Science Journal* (中国安全科学学报), 2005 15(12): 102-106.

[4] Davis Associates Limited. *Managing large events and perturbations at stations prepared for*; Rail Safety and Standards Board [R]. London, NW1 2DX RS021/ R. 01 rev 1. 1, 04, June, 2003, 19
[5] CANETTI E. *Crowds and power* [M]. London: Phoenix Press, 2000.
[6] VALACH L, YOUNG R A, LYNAM M. *A primer for applied research in the social sciences* [M]. London: Praeger, Westport, Conn., 2002.
[7] MATTHEWS L R. *Cardiopulmonary anatomy and physiology* [M]. Philadelphia: Lippincott Raven, 1996.
[8] STEPHEN Pheasant. *Bodyspace: anthropometry, ergonomics and the design of the work* [M]. 2nd ed. USA Taylor & Francis Inc., 2001.
[9] LIU Yu (刘禹), LIN Wei (林威), LI Dezhi (李德志). *The quantitative model of crowd evacuation in Olympic venue* (奥运会场馆人员疏散的数学模型)[R]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002
[10] LIDTHILL M.J, Whitham G B. On kinematic waves. I; Flood movement in long rivers; II; Theory of traffic flow on long crowded roads [J]. *Proc R Soc London*, Ser. 1955, A, 229: 281-345.
[11] HUGHES R L. A continuum theory for the flow of pedestrians[J]. *Transportation Research Part B: Methodology*, 2002, 36: 507-535.
[12] GREENSHIELDS B D. A study of traffic capacity[C] // *Highway Res Board, Proc Annual Meet*, 1934, 14: 448-477.
[13] UNDERWOOD R. Speed, volume, and density relationships[C] // Yale Bureau of Highway Traffic. *Quality and theory of traffic flow*, New Haven, Conn, 1961: 141-188.
[14] RIS S C Lee, ROGER L Hughes. Exploring trampling and crushing in a crowd[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2005, 131(8): 575-582.

Effects of crowded people density on crushing fatalities

RAN Li-jun, LIU Mao
(Urban Public Safety Research Center, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The present paper is aimed to introduce our research into the effect of the crowded people density on the crushing fatalities. As is known, previous studies have identified the crowd density as the main risk factor leading to such crushing tragedies. In this paper, we have explored the crush fatalities of pedestrians in terms of the density of the crowd while referring to the continuous crowd flow model proposed by Hughes from Australia. According to the feature in different densities of the crowd, we can analyze the crushing accidents based on the here-introduced flow model proposed by Hughes. However, the maximum tolerance limits of the crowd density are also variable, which depend strongly on the physical characteristics of the crowd, or the crowd of pedestrians in particular involved. Integrating the realistic conditions of the Chinese crowd features, we assume the following $9\text{ped}/\text{m}^2$ as the Chinese max tolerable crowd densities. Consequently, it can be concluded that the model helps to identify the dangerous locations for a crushing accident likely to be taking place. And, in tum, the model proves significant to avoid such accidents and ensure safety of the crowd gathering.

Key words: safety management engineering; crowd crushing; accident; crowd density; continuum crowd flow model

CLC number: X928.03 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2007)04-0135-04