

基于突变理论的装配式建筑施工安全评价

常春光,张赛玉

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:通过对装配式建筑施工安全影响因素和事故类型的分析,从施工人员安全性、施工机械安全性、施工材料及构件安全性、施工作业安全性4个方面构建了装配式建筑施工安全评价指标体系,并引入突变理论建立了评价模型,结合工程实例,对装配式建筑施工安全进行了评价。

关键词:装配式建筑;影响因素;施工安全;突变理论

中图分类号: TU714

文献标志码: A

随着我国现代化进程的不断推进,建筑产业化发展取得了一定的成绩,装配式建筑作为一种新型建筑近年来得到了大力推广。2016年发布的《国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》^[1]中,明确提出了“大力发展装配式建筑和钢结构建筑”。国务院于2016年9月发布的《关于大力发展装配式建筑的指导意见》^[2]中再次提出了“八项任务”,来促进装配式建筑的发展。自2018年2月1日起实施的《装配式建筑评价标准》提出了适用于民用建筑的装配化的评价标准,使装配式建筑的评价体系得到了丰富,也可以看出政府对装配式建筑发展越来越重视。与传统建筑相比,装配式建筑的优势主要在于:节能环保、可以加快施工速度、降低人为因素、减少人工费用,但由于装配式建筑施工安全管理体制尚不成熟,现阶段既能熟练操作又能满足现场施工工艺要求的工人极其匮乏,施工现场存在很多安全隐患,建筑安全生产事故频繁发生,故迫切需要解决建筑施工安全问题,才能使装配式建筑继续蓬勃发展。

目前,针对传统建筑的施工安全评价体

系已经较为成熟。在装配式建筑施工安全评价方面,陈伟等^[3]应用层次分析法(AHP)及灰色聚类评价方法对装配式建筑工程施工安全状态进行评价;刘迪^[4]通过研究施工现场各个阶段的安全风险,找出装配式建筑安全管理的主要影响因素;罗杰等^[5]通过分析装配式建筑施工的难点与特点,得出了装配式建筑施工安全管理的若干要点。近年来各学者对于装配式建筑施工安全的研究极大地丰富了装配式建筑的相关理论,在装配式建筑施工安全评价方面做出了较大贡献,但是考虑到装配式建筑施工安全事件往往是突然发生的,具有突变性的特点,对于装配式建筑施工安全的突变性机制规律方面的研究还有待于加深。

突变理论是由法国数学家 René Thom^[6]于20世纪60年代后期创立,并由英国数学家 E. C. Zeeman^[7]于20世纪70年代对突变理论的发展应用做了进一步的研究而得出的关于突变现象的一种新兴数学理论。其优点是可以反映安全风险事件的突变性机制规律,提升安全风险评价的科学性,为装配式建

筑施工安全评价提供依据。

一、装配式建筑施工安全影响因素与事故类型分析

1. 装配式建筑施工安全影响因素分析

由于施工工艺和施工特点的不同,装配式建筑与传统建筑在施工安全的影响因素及管理方面不尽相同。装配式建筑施工风险主要存在于构配件运输、构配件吊装布置等方面,故安全管理的侧重点也不再是传统建筑施工过程中混凝土浇筑、钢筋绑扎等方面的管理。笔者在阅读相关文献的基础上结合现场实际情况对装配式建筑施工安全的关键影响因素总结如下:

(1) 人员因素。首先,从业人员的素质可以表现为从业者对安全生产基础知识的了解和对作业的熟练程度,装配式建筑所需的施工人员数量较少,但对从业人员的文化素质水平要求较高;其次,现场施工人员需了解并遵守装配式建筑施工操作规程及作业要求,施工人员若对装配式建筑施工的施工工艺及技术不熟悉,缺乏从事装配式建筑施工的工作经验,就会导致施工现场安全事故的发生^[8];再次,在装配式建筑施工人员配置方面需要合理安排,避免一人身兼多个岗位。

(2) 机械因素。装配式建筑由于其自身施工的特点,现场吊装设备会比较多,这样就涉及现场吊装设备该如何布置的问题,若现场材料需要二次搬运,则很容易导致事故的发生。在施工过程中,设备长时间地运行甚至不停运转,且装配式建筑中构件单件质量较大数量较大,对机械设备的损耗是很大的,如果不对设备进行定期检测和日常保养维修,很可能就会由于机械老化导致人员的伤亡。操作机械的过程中,施工人员自身的操作规范也是影响机械安全性的因素之一,不规范的操作也会导致机械伤人。

(3) 构件与材料因素。预制构件与吊装设备的连接十分重要,如果构件出厂时预制构件的埋件就已松动,那么在吊装时构件很容易掉落伤人。预制构件存放的位置和运输

路径也尤为重要,预制构件体积较大,如随意堆放易造成构件倒塌伤人事故,预制构件在运至现场的过程中若路线不合理,在现场中随意移动,运输车上防护措施不完备,就很容易造成运输过程中构件从运输车上脱落砸人。钢筋套筒灌浆连接是装配式建筑结构中受力钢筋的重要连接方法,预制构件的连接钢筋和套筒位置是否准确是保证现场顺利安装和连接的关键。在现场连接构件时,由于预制构件较大,构件之间的连接不紧密、螺栓预埋不到位、临时支撑不到位都很容易导致构件掉落伤人,与此同时,人员技术水平越高才能使施工过程越安全,避免安全事故的发生。

(4) 施工作业因素。首先,装配式建筑施工受制于自然环境的影响,当出现风、雨等恶劣天气时,会严重影响构件的吊装效率和现场安全,同时,装配式建筑的施工安全也受制于现场的施工环境,场地平整度、现场垃圾堆放情况、现场道路情况等都会对安全情况产生影响;其次,现场安全检查也是决定施工安全事故是否发生的关键,若能对现场进行定期有效的安全检查,就可以避免部分事故的发生;再次,装配式建筑施工过程的安全状况与安全制度的制定和执行紧密相关,施工现场人员对于安全制度的严格执行可有效减少或避免安全事故的发生。

2. 装配式建筑施工事故类型分析

根据对中华人民共和国住房和城乡建设部通报的《2015 年全国房屋市政工程生产安全事故情况》及有关建筑施工安全生产形势的文献分析^[9],同时结合装配式建筑工程施工特点,梳理出发生频率较高的 7 类主要施工安全事故:

(1) 高空坠落事故。据统计,高空坠落事故在普通建筑安全事故中的比例远远高于其他事故类型,而装配式建筑由于自身施工特点,为了方便构件的吊装及运送,不宜搭设内外脚手架,并且由于工程需要,工人必须要在高层临边作业,这样就导致高空坠落事故的频繁发生^[10]。

(2)物体打击事故。由于装配式建筑施工过程中不可以设防护网,钢筋、部件、构件等由于工人操作不规范或缺乏安全意识,构配件及大块混凝土等极有可能从高空掉落,很容易砸伤甚至危及施工人员的生命。

(3)构件吊装事故。塔吊在吊装构件时,构件易发生翻转或由于预埋件松动产生位移以至于脱离吊钩,或由于起吊点不适宜导致构件状态不稳定而发生脱落,对塔吊下方工作人员造成伤害^[11]。

(4)构件倒塌事故。鉴于装配式建筑的特点,施工现场需要堆放大量预制构、配件,构件的存放和运输问题至关重要,一旦堆放位置不适宜,就很容易造成现场施工人员的伤亡。并且预制构件在连接之前需要进行临时固定和搭接,此时如果混凝土强度不够,构件的连接很容易失效,易造成坍塌,危及施工人员的安全。

(5)吊装机械伤害事故。装配式建筑施工中需要以大型起重机对构配件进行吊装工作,但构件体积较大且形状不规则,极有可能在吊装过程中由于操作失误或塔机的位置不合理等原因造成吊装机械伤害事故。

(6)火灾事故。在装配式建筑施工过程中,需要运用大量的粘合剂、稀释剂等易燃易爆的化学物质,并且在吊具等的保养过程中,又有废旧的油手套、棉球等易燃物的产生,如果在施工现场随意丢弃烟头或遇到电线短路等情况极易引起火灾。

(7)触电事故。在施工过程中,涉及大量用电作业,临时供电箱等常常放置在户外。受环境的影响,电线长期暴露在外易老化以及发生短路,从而造成触电事故。

二、装配式建筑施工安全评价指标体系的构建

建立安全评价指标体系是进行建筑施工安全综合评价的基础。装配式建筑施工生产的产品具有特殊性,施工现场因素复杂且各因素之间相互影响,所以装配式建筑施工安全评价指标的确定是一项复杂的工作。

针对上述装配式建筑施工安全影响因素及7种施工安全事故,通过采用专家询问法,归纳出以下13个指标对7种安全事故的影响关系(见表1)。

表1 装配式建筑施工安全影响指标对事故类型的影响关系

指标	高空坠落 事故	物体打击 事故	构件吊装 事故	构件倒塌 事故	吊装机械 伤害事故	火灾事故	触电事故
人员素质 u_1	是	是	是	是	是	是	是
技术水平 u_2	否	是	是	否	是	否	否
安全生产教育培训 u_3	是	是	是	是	是	是	是
现场人员配置 u_4	是	是	否	否	否	是	是
现场塔机的布置 v_1	否	是	是	否	是	否	否
施工机械的检查及保养 v_2	否	否	是	否	是	否	是
机械操作规范 v_3	否	是	是	否	是	否	是
预制构件吊装 w_1	否	是	是	否	是	否	否
构件的存放和运输 w_2	否	是	是	是	否	否	否
构件的连接 w_3	否	是	否	否	否	否	否
现场安全规程与制度的确立与 执行 t_1	否	否	是	是	是	是	是
安全检查 t_2	是	是	是	是	是	是	是
作业环境及空间 t_3	是	是	是	是	是	是	是

将以上13个指标进行归类整理,装配式建筑施工安全管理评价指标可以分为4方面:施工人员安全性 u ,施工机械安全性 v ,施工材料及构件安全性 w ,作业方法安全性 t 。

每个二级指标下设了若干个三级评价指标。采用Delphi专家打分法确定各指标重要性排列顺序,重要指标在前,次要指标在后,具体设置如表2所示。

表 2 装配式建筑施工安全评价指标体系

目标层	指标层	准则层
装 配 式 建 筑 施 工 安 全 评 价	u	u_1
		u_2
		u_3
		u_4
	v	v_1
		v_2
		v_3
	w	w_1
		w_2
		w_3
	t	t_1
		t_2
		t_3

三、突变理论的基本模型建立与推导

突变理论是描述系统状态突然发生变化的一种理论,参数变化时,系统状态也会发生变化,当参数处于某个范围内,系统状态就会发生突变。

1. 突变理论基本模型的建立

势函数是初等突变理论最主要的研究对象之一,通过对势函数的推导出临界点,通过分析临界点的特性,进而判断各点是否处于突变区域内。势函数中有两类变量:一种是状态变量(行为变量),它代表系统的行为状态;一种是控制变量,可以把它当作影响状态变量的各因素。一般来说,状态变量即为要分析的对象,维数为 1,控制变量即为影响因素,根据控制变量的维数可以将突变模型分为 4 种,分别为折叠突变、尖点突变、燕尾突变和蝴蝶突变,4 种突变模型的势函数分别为 $f_1(x) = x^3 + ax$, $f_2(x) = x^4 + ax^2 + bx$, $f_3(x) = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$, $f_4(x) = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$, 其对应的控制变量维数分别为 1,2,3,4。

首先,对势函数 $f(x)$ 求一阶导数,并令 $f'(x) = 0$,即可得到临界点集合成的平衡曲面,再对 $f(x)$ 求二阶导数,并令 $f''(x) = 0$,得到平衡曲面的奇点集,联合一阶和二阶导数方程,将状态变量消去,即可得到分解形式的分歧方程。将控制变量带入分歧方程中且满足时,系统将会产生突变。

以尖点突变模型为例,对其分歧方程进行推导,尖点突变势函数为

$$f_2(x) = x^4 + ax^2 + bx \tag{1}$$

对 $f_2(x)$ 进行求导,并令其等于 0,其平衡曲面 M 为

$$4x^3 + 2ax + b = 0 \tag{2}$$

再对 $f_2(x)$ 求二阶导数,并令其等于 0,其奇点集为

$$12x^2 + 2a = 0 \tag{3}$$

对方程(2)、(3)进行联立,消去状态变量 x 即可得分歧方程

$$a = -6x^2 \tag{4}$$

$$b = 8x^3 \tag{5}$$

同理可得:折叠突变模型的分歧方程为

$$a = 0 \tag{6}$$

燕尾突变模型的分歧方程为

$$a = -6x^3 \tag{7}$$

$$b = 8x^3 \tag{8}$$

$$c = -3x^4 \tag{9}$$

蝴蝶突变模型的分歧方程为

$$a = -10x^2 \tag{10}$$

$$b = 20x^3 \tag{11}$$

$$c = 15x^4 \tag{12}$$

$$d = 4x^5 \tag{13}$$

2. 突变模型归一化公式的进一步推导
仅仅通过势函数还不足以对系统进行安全评价,还需要通过势函数和分歧方程推导出归一化公式,其目的是将控制变量所表示的质态转化为可以比较的同一质态,使控制变量和状态变量的取值范围控制在 0~1,这样就可以求出能反映系统特征的总突变隶属度值,根据突变隶属度值对系统进行综合评价。

以尖点突变模型为例,分歧方程可转化为

$$x_a = \sqrt{\frac{a}{-6}} \tag{14}$$

$$x_b = \sqrt[3]{\frac{b}{8}} \tag{15}$$

若令 $|x| = 1$,则 $a = -6$ 、 $b = 8$,由此可以得到 a 、 b 、 x 的取值范围分别为:0~6, 0~8, 0~1,此时 a 、 b 、 x 具有不同的取值范围,为了

使运算简单准确,把变量的范围也都转化为 0~1。故将控制变量 a 、 b 分别缩小 6 倍和 8 倍,据此可以得到尖点突变模型的归一化公式为: $x_a = a^{\frac{1}{2}}, x_b = b^{\frac{1}{3}}$ 。

基于同样的处理方式,可分别得到:

燕尾突变模型的归一化公式为

$$x_a = a^{\frac{1}{2}}, x_b = b^{\frac{1}{3}}, x_c = c^{\frac{1}{4}}。$$

蝴蝶突变模型的归一化公式为

$$x_a = a^{\frac{1}{2}}, x_b = b^{\frac{1}{3}}, x_c = c^{\frac{1}{4}}, x_d = d^{\frac{1}{5}}。$$

3. 基于突变模型的系统综合评价

在得到底层指标的隶属度值后,按归一化公式计算出各层指标的突变级数值,逐级向上递归运算求得系统安全总突变值。但此计算过程必须结合实际情况考虑“互补”和“非互补”两个原则。

(1)“非互补”原则。若一个系统中各影响因素之间彼此独立,即相互之间没有任何联系时,采用“大中取小”的原则,即要从控制变量中选择其中最小值作为整个系统的值。

(2)“互补”原则。若一个系统中因素之间有一定的联系,或者具有一定相同点时,则取系统的值为控制变量的平均值。

四、基于突变理论的装配式建筑施工安全评价应用与例证分析

1. 评价分级标准的制定

装配式建筑施工安全评价分级标准的制定对于准确评价一个工程的安全性至关重要,基于突变理论的特点,采用常用等级标准,即安全性较差、安全性一般、安全性较好、安全性好,对应分级标准分别为 $[0.00, 0.25]$, $(0.25, 0.50]$, $(0.50, 0.75]$, $(0.75, 1.00]$ 。

2. 实例分析

以沈阳市某一装配式建筑工程为例,运用突变理论对该工程的施工安全状态进行评价。

根据表 2 建立的装配式建筑施工安全管理评价指标体系,聘请多位装配式建筑施工安全管理方面的专家和现场的管理工作人员

基于安全分级标准对该装配式建筑的底层指标进行打分,并对各位专家打分取平均值,打分结果如下。

施工人员安全性:

$$U = [0.553, 0.789, 0.237, 0.343]$$

施工机械安全性:

$$V = [0.954, 0.838, 0.273]$$

施工材料及构件安全性:

$$W = [0.219, 0.411, 0.811]$$

施工作业方法安全性:

$$T = [0.135, 0.490, 0.207]$$

以施工人员管理安全性为例说明具体计算方法,施工人员管理下有 4 个三级指标,故采用蝴蝶突变模型归一化公式,得到:

$$x_{u_1} = u_1^{1/2} = (0.553)^{1/2} = 0.744$$

$$x_{u_2} = u_2^{1/3} = (0.789)^{1/3} = 0.924$$

$$x_{u_3} = u_3^{1/4} = (0.237)^{1/4} = 0.698$$

$$x_{u_4} = u_4^{1/5} = (0.343)^{1/5} = 0.807$$

由于装配式建筑施工安全特点,各底层指标直接可替代性较小,故采用“非互补”原则,即大中取小原则,取其中最小值作为上级指标的突变值,得到:

$$x_u = \min(x_{u_1}, x_{u_2}, x_{u_3}, x_{u_4}) = 0.698$$

同理可求得:

$$x_v = 0.723, x_w = 0.468, x_t = 0.367$$

一级指标下的二级指标有 4 个,符合蝴蝶突变模型归一化公式条件,得到:

$$x_1 = x_u^{1/2} = (0.698)^{1/2} = 0.835$$

$$x_2 = x_v^{1/3} = (0.723)^{1/3} = 0.898$$

$$x_3 = x_w^{1/4} = (0.468)^{1/4} = 0.827$$

$$x_4 = x_t^{1/5} = (0.367)^{1/5} = 0.818$$

同样采用“非互补”原则,得到:

$$x = \min(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0.827$$

3. 评价结果

该工程施工安全评价突变隶属度值为 0.827,从预先设定的安全评价等级区间看,该工程施工现场安全性好。同时,可以看出作业方法安全性、施工材料和构件安全性及施工机械安全性的突变级数较施工人员安全性的突变级数低,说明对于该单位来说,现场施工作业方法、现场施工材料及构件的管理、

施工机械的管理为其薄弱项,在后期施工过程中对此 3 项的管理有待加强,要做到现场实时监控,并对施工不规范处及时提出整改意见,避免因某项管理不到位导致事故发生的情况。

五、结 语

针对装配式建筑施工安全的评价体系仍不完善,而将突变理论应用于施工安全评价目前尚不多见,突变理论可以有效地规避主观权重对于安全评价的影响,使处理后的数据能客观地反映出工程施工安全的真实情况,但是此种方法也有一定的不足,打分合理性及底层指标重要度划分都会对评价结果产生影响,这部分内容有待于在下一步工作中继续进行研究。

参考文献:

[1] 张兴凯,任智刚,曾明荣,等.我国《国民经济和社会发展规划第十三个五年规划纲要》对安全生产战略影响量化分析[J].中国安全生产科学技术,2016,12(7):5-9.

[2] 国务院办公厅发布《关于大力发展装配式建筑的指导意见》[J].中国建筑金属结构,2016

(11):18-19.

[3] 陈伟,付杰,熊付刚,等.装配式建筑工程施工安全灰色聚类测评模型[J].中国安全科学学报,2016,26(11):70-75.

[4] 刘迪.装配式混凝土建筑的安全施工管理[J].建筑施工,2016,38(7):991-992.

[5] 罗杰,宋发柏,沈李智,等.装配式建筑施工安全管理若干要点研究[J].建筑安全,2016(8):19-25.

[6] THOM R. Stabilité structurelle et mor-phogenese[J]. Poetics,1972,3:7-19.

[7] ZEEMAN E C. Bifurcation, catastrophes and turbulence new directions in applied mathematics[M]. New York:Springer-Verlag,1982.

[8] 王雪妮.浅析装配式建筑施工中危险分析与安全管理[J].四川水泥,2018(3):231.

[9] 徐峰,宋元斌,胡昊.建筑施工中临边高处坠落危险源影响空间建模[J].中国安全科学学报,2011,21(4):102-108.

[10] 张红平.装配式建筑施工安全管理分析[J].建材与装饰,2017(50):183-184.

[11] 徐姣姣,江林,黄萍莉.基于系统动力学的装配式建筑安全风险影响因素分析[J].西华大学学报(自然科学版),2018,37(2):23-28.

Safety Evaluation of Fabricated Building Construction Based on Catastrophe Theory

CHANG Chunguang,ZHANG Saiyu

(School of Management,Shenyang Jianzhu University,Shenyang 110168,China)

Abstract:Based on the analysis of influencing factors and accident types of assembly building construction safety,the evaluation index system of assembly building construction safety is constructed from four aspects:construction personnel safety,construction machinery safety,construction materials and components safety,and construction operation safety. Catastrophe theory is also introduced to establish the evaluation model. An engineering example is given to evaluate the safety of fabricated building construction.

Key words:assembly architecture;influence factor;construction safety;catastrophe theory