

吴俊,廖炜,王涛.高强度地震下建筑施工场点危险性建模分析[J].地震工程学报,2018,40(4):833-840.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.833

WU Jun, LIAO Wei, WANG Tao. Risk Modeling Analysis of Construction Sites under High-intensity Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 833-840. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.833

# 高强度地震下建筑施工场点危险性建模分析

吴俊<sup>1</sup>, 廖炜<sup>1</sup>, 王涛<sup>2</sup>

(1. 江西环境工程职业学院, 江西 赣州 341000; 2. 南昌大学, 江西 南昌 330031)

**摘要:** 在高强度地震环境下, 建筑施工场点易发生危险, 传统方法运用 AHP 算法对建筑施工场点的危险性进行分析, 但未考虑抗震约束, 存在分析效果差的弊端。因此, 提出一种高强度地震下建筑施工场点危险性建模分析方法。首先采用 TOPSIS 方法得到地震风险评估指标, 构建风险评估指标的物元分析模型, 基于 AHP-熵权法的组合赋权获取地震风险评估指标的综合权重。然后通过贝叶斯网络来推导高强度地震下建筑施工场点危险性参数, 运用地震等级的划分标准和推算方法, 依据建筑施工场点危险性评估准则和接受原则 APLARP, 利用物元分析模型中不同危险节点的致因关系和综合权重构建施工场点风险评估模型, 完成对高强度地震下建筑施工场点危险性的建模分析。实验结果表明, 所设计模型可准确分析高强度地震下建筑施工场点的危险性, 能够确保整体施工的安全性, 具有重要的应用价值。

**关键词:** 高强度地震; 建筑施工场点; 危险性; 评估模型

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)04-0833-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.833

## Risk Modeling Analysis of Construction Sites under High-intensity Earthquakes

WU Jun<sup>1</sup>, LIAO Wei<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Environmental Engineering Vocational College, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

2. Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China)

**Abstract:** Construction sites pose dangers in a high-intensity earthquake environment. The traditional AHP algorithm is often used to analyze the risk of construction sites but provides poor analysis results because it ignores earthquake resistance. Therefore, a risk modeling method for construction sites under high-intensity earthquakes is proposed. First, the TOPSIS method is used to obtain the indexes of earthquake risk assessment, and the matter element analysis model of risk assessment index is constructed. The comprehensive weight of the seismic risk assessment index is obtained on the basis of the combination weighting of the AHP-entropy weight method. Then, the Bayesian network is used to deduce the risk parameters of construction sites under

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(51366012)

第一作者简介: 吴俊(1985-), 女, 江西赣州人, 硕士, 讲师, 研究领域: 工程管理、职业教育等. E-mail: 16622045@qq.com.

high-intensity earthquakes. A risk assessment model of construction sites is constructed by using the dividing standard and the calculating method of earthquake magnitude in accordance with the risk evaluation criteria and acceptance principle of building construction sites. The model can be used to complete the modeling analysis of the risk of construction sites under high-intensity earthquakes. Experimental results show that the designed model can accurately analyze the hazards of construction sites under high-intensity earthquakes and ensure the safety of the whole construction site. Therefore, the model has important application values.

**Keywords:** high-intensity earthquake; building construction site; risk; assessment model

## 0 引言

目前我国城市建设呈现飞速发展趋势,人口与建筑物存在高度集中的现象,遇到高强度地震会造成严重的人员伤亡和损失。基于人们日常生活的舒适性与安全性,各种基坑工程、高层建筑的抗震性能日益受到关注。现代建筑工程结构繁琐独特,人们对于建筑的使用寿命期待较高,所以大量不可预测的风险因素也不断涌现。若爆发高等级地震灾害,会对建筑施工场点带来巨大的危害,从而造成资源损失,甚至威胁施工人员的生命财产安全。所以,在进行工程施工之前要考虑建筑场点的危险性,对建筑施工场点的危险性进行建模分析,可以达到有效控制各种不确定风险因素的效果。传统基于 AHP 算法对高强度地震下建筑工程施工危险性进行建模分析时,未考虑抗震约束,存在分析效果差的弊端<sup>[1]</sup>。针对该问题,提出高强度地震下建筑施工场点危险性建模分析方法,运用该方法不仅能够准确分析出建筑施工场点的危险性,还能确保工程施工顺利进行,减少人员伤亡及财产损失。

## 1 考虑抗震约束的建筑工程施工场点危险性建模分析

危险性建模分析的实质,就是对施工场点的风险进行评估。风险评估质量的优劣决定了危险性分析的效果是否理想。对危险进行准确评估,能够确保施工场点的安全<sup>[2]</sup>,具体方法如下。

### 1.1 获取地震风险评估指标

影响地震灾害风险的因素很多,归纳起来主要可分为 4 个方面:(1)场地条件;(2)建筑密度;(3)建筑物的抗震能力;(4)防灾救灾环境<sup>[3]</sup>。

采用 TOPSIS 方法得到地震风险评估指标:U1 为任意调控支撑点,U2 为封底方法存在弊端,U3 为放坡较陡。通过 TOPSIS 法对 U1、U2、U3 的风险因素实施采集,确保地震风险概率、地震风险损失、地震风险可控度在专家评分法研究之下实施权

重分配,得到规范的指标因子。

(1) 初始决策矩阵的初始指标因子权重见表 1 所列。

表 1 初始高强度地震风险因子指标

Table 1 Initial risk factor indexes under high-intensity earthquakes

风险因素	风险概率 $P$	风险损失 $C$	风险可控度 $L$
$U$	2.99	2.99	2.99
$U1$	2.76	3.14	3.14
$U2$	3.01	3.03	2.64
$U3$	2.85	2.87	3.03

(2) 矩阵标准化处理:成本型指标是地震风险概率和地震风险损失,效益型指标是地震风险可控度,对这些地震风险指标实施规范化处理得到的结果见表 2 所列。

表 2 规范化高强度地震风险因子指标数值

Table 2 Normalized risk factor indexes under high-intensity earthquake

风险因素	风险概率 $P$	风险损失 $C$	风险可控度 $L$
$U$	0.47	0.92	0.14
$U1$	0.99	0	0.99
$U2$	0	0.13	0.41
$U3$	0.63	0.99	0

(3) 运算加权距离平方和以及加权距离。 $w_1, w_2, \dots, w_n$  表示地震指标属性,不同决策正负理想值之间的加权距离平方和用公式 1 表示。

$$f_i(\omega) = f_i(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \sum_{j=1}^n \omega_j^2 (1 - r_{ij})^2 + \sum_{j=1}^n \omega_j^2 r_{ij}^2 \quad (1)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  分别表示地震权重风险概率、地震风险损失、地震风险可控度,相关学者对其做出的权重打分分别是:0.315、0.330、0.355。通过公式(1)得出:

$$f_y(\omega) = 0.030\ 2, f_{y1}(\omega) = 0.234\ 9, f_{y2}(\omega) = 0.159\ 4, f_{y3}(\omega) = 0.012\ 9$$

(4) 对目标实施排序<sup>[4]</sup>,则有:

$$f_{y3}(\omega) > f_y(\omega) > f_{y2}(\omega) > f_{y1}(\omega) \quad (2)$$

通过上述方法得到地震风险评估指标,从而获取高强度地震下建筑施工场点风险指标:U1 任意调控支撑点、U2 封底方法存在弊端指标被过滤、U3 保留大坡度放坡、U8 槽底沉渣未完全清除、U13 失衡挖掘,获取建筑工程施工场点风险因素指标体系见表 3。

表 3 施工场点风险因素指标

Table 3 Risk factor indexes of construction sites

序号	风险因素
C1	坡顶堆载
C2	交通动荷载过大
C3	施工扰动
C4	锚拉杆体系施工差
C5	护坡桩悬臂过长
C6	提前拆支撑
C7	桩长深入土体不到位
C8	支撑安装不及时
C9	超挖
C10	土钉墙焊接强度不足
C11	土钉入土深度不够
C12	底部土体加固不到位
C13	暴露时间过长
C14	围护墙体深入基坑底部深度较小
C15	不对称开挖

## 1.2 构建风险评估指标的物元分析模型

### 1.2.1 构建物元分析模型

(1) 确定经典域。相关学者在文章描述的 15 个风险标准基础上把地震约束下的高层建筑施工范围归纳成  $R_1, R_2, \dots, R_{15}$ , 具体的,  $N_{15}$  与  $R_{15}$  相对应, 象征着小风险部分, 由此得出:

$$R_j = (N_j, C_i, V_{ji}) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $j$  个不同等级用  $N_j$  来描述;  $N_j$  的  $n$  个不同特征用  $c_1, c_2, \dots, c_n$  来描述; 基于  $c_1, c_2, \dots, c_n, N_j$  的取值范围用  $v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jn}$  来描述, 也就是经典域。

(2) 确定节域。节域也就是 15 个地震风险等级的所有集合, 用下式表示:

$$R_p = (p, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} p & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: 所有待评对象用  $p$  来描述; 基于  $c_1, c_2, \dots, c_n, p$  的取值范围用  $v_{p1}, v_{p2}, \dots, v_{pn}$  来描述, 也就是  $p$

的节域。

(3) 确定待评物元。通过对地震约束下的建筑施工风险信息进行分析<sup>[5]</sup>, 确保得到不同指标的数值, 如下:

$$R_0 = \begin{bmatrix} p_0 & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: 待评物元用  $p_0$  来描述;  $p_0$  基于  $c_1, c_2, \dots, c_n$  检测的实际数据分别用  $v_1, v_2, \dots, v_n$  来描述。

### 1.2.2 基于 AHP- 熵权法的组合赋权

(1) 层次法确定权重。为获取权重向量  $\alpha$ , 通过层次分析法对不同评估指标进行权重分析。

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T \quad (6)$$

(2) 熵权法确定权重。为获取权重向量  $\beta$ , 使用熵权法对不同的评估指标进行权重分析。

$$\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]^T \quad (7)$$

(3) 组合赋权。融合上两步获取的权重, 得到综合权重  $\omega_i$ :

$$\omega_i = \frac{\alpha_i \beta_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

通过上式获取了地震风险评估指标的综合权重, 可以利用物元分析模型中不同危险节点的致因关系和综合权重构建施工场点风险评估模型, 完成对高强度地震下建筑施工场点危险性的建模分析。

## 1.3 建筑施工场点危险性参数求导

基坑施工时存在大量干扰建筑抗震性能的风险因素, 塑造贝叶斯网络模型时存在大量的节点。应先分析考虑抗震约束的基坑工程施工时干扰事故形成的风险因素, 将获取的 15 个风险因素当成贝叶斯网络结构节点。实际应用过程中, 采用调查问卷手段得到网络结构的全部参数<sup>[6]</sup>, 获取基坑项目施工过程中考虑抗震约束的风险评估贝叶斯网络参数的概率排列情况<sup>[7]</sup>如下:

设置贝叶斯网络模型具备  $n$  个节点, 那么  $Z = (E_1, E_2, \dots, E_n)$  表示网络结构的节点集合。设置  $E_i$  的一个节点状态量是  $m$ ,  $[x, y]$  则是基于  $m$  的  $E_i$  概率区间, 这一结论可以从调查问卷中得出, 则有:

$$p(E_i = m) = Z[(x + y)/2] \quad (9)$$

其中贝叶斯网络模型的全部节点参数结合用  $Z$  来描述。

设置网络模型的全体顶层节点为  $E_i (1 \leq i \leq$

$n$ ),那么:

$$p(E_i = m) = \sum_{E_1, E_2, \dots, E_i = m, \dots, E_n} p(E_1, E_2, \dots, E_n) = \sum_{E_1, E_2, \dots, E_i = m, \dots, E_n} p(E_i = m | \prod E_{-i}) \quad (10)$$

基于已知根节点概率和不同层次间节点的条件概率排列情况,依据贝叶斯网络获取顶端全部节点的边缘概率排列。对基坑建筑工程施工的抗震风险实施评估时,分析地震事故风险因素得到基坑事故的种类<sup>[8]</sup>。考虑抗震约束的建筑工程施工风险指标体系,需要对基坑事故种类与风险因素内在逻辑进行分析。采用 TOPSIS 方法获取考虑抗震约束下的建筑工程施工 15 项风险指标当成贝叶斯网络节点,基于节点间的层次结构同不同因素间的因果关系<sup>[9]</sup>,以及风险指标的综合权重,依据该网络的运算理论获取不同层节点的概率排列情况,推导出高强度地震下建筑施工场点的危险性参数。

### 1.3.1 网络中各节点概率计算方法

采用贝叶斯网络模型的节点传递法使得网络结构其中一层的顶端节点概率等级为  $j$ ,基于该层次其他顶端节点概率等级小于  $j$  的原则, $j$  就是子节点的概率等级。对高强度地震下建筑施工场点危险性进行建模分析时,风险因素等级随着规定概率的降低而减少,下面进行详细描述:

$$P(B_1 = 1 | C_1 = 1, C_2 = 1, \dots) = 1$$

$$P(B_1 = 2 | C_1 = 2, C_2 = 1, \dots) = 1$$

$$P(B_1 = 2 | C_1 = 2, C_2 = 2, \dots) = 1$$

$$P(B_1 = 2 | C_1 = 1, C_2 = 2, \dots) = 1$$

$$P(B_1 = 1 | C_1 = 1, C_2 = \text{任意等级}, \dots) = 1 \dots\dots$$

$$P(B_1 = 1 | C_2 = 1, C_1 = \text{任意等级}, \dots) = 1$$

$$P(B_1 = j | C_1 \text{ 高于 } j, C_2 = \text{任意等级}) = 0$$

$$P(B_1 = j | C_2 \text{ 高于 } j, C_1 = \text{任意等级}) = 0$$

其中, $C$  表示建筑施工场点危险因素, $B$  表示危险形态。采用调查问卷手段获取该层次结构内根节点的概率值,在贝叶斯网络模型和链式传递规范下,获取网络结构中剩余节点的概率值,基于最大隶属度原则得到高强度地震下建筑施工场点事故类型同

基坑主体的风险等级。

### 1.3.2 基坑施工风险总评估与接受准则 APLARP

#### (1) 基坑工程施工风险评估准则

在对高强度地震下建筑施工场点危险性进行建模分析的过程中,要考虑到风险因子发生的概率以及事故导致的损失等因素,风险( $R$ )=发生的概率值( $P$ )×损失程度( $C$ ),这一公式在统计风险几率方面发挥着不可替代的作用,所以风险概率值可以通过风险爆发的几率与损失状况来计算,值得关注的是,进行危险性分析时容易出现评估失效现象<sup>[10]</sup>。某一时间段会发生风险概率值大,带来损失程度很低的状态,而有时又有在风险值低的状态下带来严重的损坏程度情况,这种现象与上面公式存在冲突。那么文章要着重分析怎样准确有效的实施抗震约束下的风险评估及管理。通过探究分析风险爆发的概率与损失状况,来系统、科学的实现抗震约束下基坑工程施工风险的评估<sup>[11]</sup>。

#### (2) 基于 ALARP 的基坑施工风险矩阵决策

APLARP 原则可以解释为“最低合理可行原则”。目前实施风险评估过程中应用率较高的要属 APLARP。一般实施风险评估的步骤是:获取全部风险因素的概率值和带来的损失,按照矩阵排列的方式输入到统计体系中得出结果<sup>[12]</sup>。不予考虑、可考虑、不可考虑、APLARP 最小值以及 APLARP 最大值是考虑抗震约束下的基坑工程施工风险因素评估得出的 5 个结果等级。若风险水平处于 APLARP 范围内,则要实施有效手段把风险减少到最小值。总结了基坑工程施工风险矩阵以及有关对策,详细见表 4、5、6。

表 4 风险损失描述

Table 4 Description of risk loss

等级	风险损失描述
1 级	无关紧要的
2 级	一般的
3 级	严重的
4 级	非常严重的
5 级	灾难性的

表 5 风险评估矩阵

Table 5 Risk assessment matrix

概率等级	损失等级				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
1 级	不予考虑	不予考虑	可考虑	可考虑	APLAR 最小值
2 级	不予考虑	不予考虑	可考虑	APLAR 最小值	APLAR 最大值
3 级	可考虑	可考虑	APLAR 最小值	APLAR 最大值	不可考虑
4 级	可考虑	APLAR 最小值	APLAR 最大值	不可考虑	不可考虑
5 级	APLAR 最小值	APLAR 最大值	不可考虑	不可考虑	不可考虑

表 6 基本风险对策

Table 6 Basic risk countermeasures

风险等级	风险对策描述
不可考虑	采用科学、有效的对策,使利于萌生风险的环境减少到相应 ALARP 范围内
ALARP 范围	实施合理对策,确保关键性探究对象是工程区内的风险因素,通过上述分析得出详细手段来降低风险水平
可考虑	在风险评估过程中科学的管理此类因素,当风险发生时不用马上实施约束
不予考虑	不考虑此类风险因素

在风险评估指标体系的基础上,考虑基坑工程的周边环境以及基坑事故状况,采用风险概率等级的划分标准和推算方法<sup>[13]</sup>,明确考虑抗震约束的建筑工程施工风险评估准则和接受原则,基于评估体系中不同节点的致因关系和节点权重,塑造考虑抗震约束的风险损失和风险概率的评估模型<sup>[14]</sup>,如图 1 所示。其中,C 描述考虑抗震约束的建筑工程施工风险因素,B 描述风险形态,A 描述风险类型,S 描述风险体系。

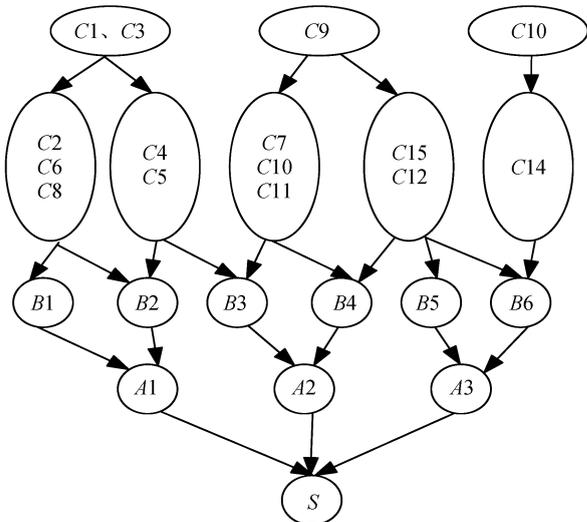


图 1 基于风险损失和风险概率的评估模型

Fig.1 Evaluation model based on risk loss and risk probability

综上所述,采用 TOPSIS 方法得到了地震风险评估指标,构建了风险评估指标的物元分析模型,并获取了地震风险评估指标的综合权重。从而推导出高强度地震下建筑施工场点的危险性参数,利用物元分析模型中不同危险节点的致因关系和综合权重构建施工场点风险评估模型,完成了对高强度地震下建筑施工场点危险性的建模分析。

## 2 实验分析

为了验证所提的高强度地震下建筑施工场点危险性建模分析方法的有效性,采用分析方法中构建的风险评估模型对某城市某住宅基坑工程施工场点

风险进行评估。通过运用数据统计和专家评分的措施,分析调查问卷采集的信息,得到风险因素对应节点的概率分布表<sup>[15]</sup>,基于底层节点的先验概率对施工场点风险进行评估。通过调查汇总基坑资料,得到原始底层全部节点概率,见表 7 所列。

表 7 施工场点风险因素概率分布

Table 7 probability distribution of construction site

风险概率	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
C1	0	0	0.661	0.317	0
C2	0	0	0.843	0.135	0
C3	0	0.224	0.609	0.144	0
C4	0	0.342	0.636	0	0
C5	0	0.436	0.542	0	0
C6	0	0.518	0.407	0	0
C7	0	0.721	0.257	0	0
C8	0	0.536	0.442	0	0
C9	0	0.324	0.654	0	0
C10	0	0.309	0.532	0.136	0
C11	0	0.672	0.308	0	0
C12	0	0.324	0.654	0	0
C13	0	0.636	0.342	0	0
C14	0	0.531	0.447	0	0
C15	0	0.422	0.556	0	0

基于所提模型以及父节点形成一致概率等级子节点的链式传递规范,获取贝叶斯网络模型的其他节点概率等级排列情况,如 B1 的风险因子传递路径如图 2 所示。

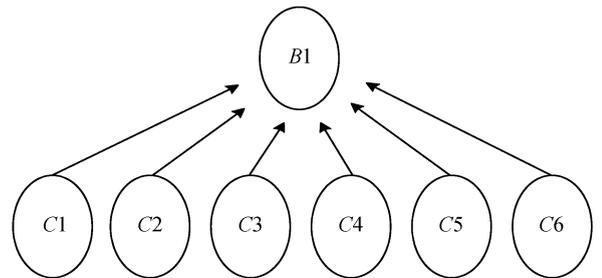


图 2 风险因子传递路径

Fig.2 Transfer path of risk factors

节点 B1 的第三等级概率用  $P = (B_1 = Y_3)$  表示。 $Y_n$  中的风险等级用  $n$  来描述,基于  $C_1, C_2, \dots, C_n$  相互独立,结合其概率表示:用风险出现的概率推算方法得出, B1 不可能出现  $Y_1, Y_2, Y_5$  的状况。那么

$$P = (B_1 = Y_3) = (B_1 = Y_3 | C_1 = Y_3, C_2 = Y_3, \dots, C_5 = Y_3) \cdot P(C_1 = Y_3) \cdot P(C_2 = Y_3) \cdot \dots \cdot P(C_5 = Y_3).$$

由概率推算方法可得  $P(B_1 = Y_3 | C_1 = Y_3, C_2 = Y_3, \dots, C_5 = Y_3) = 1$ , 那么基于  $C_n$  概率法则有:

$$P = (B_1 = Y_3) = 1 \times 0.672 \times 0.854 \times (0.235 + 0.610) \times 1 \times 1 \times 1 = 0.485 \quad (10)$$

同理则有  $P = (B_1 = Y_4)$

因此获取不同节点的等级风险概率见表 8 所列。

表 8 节点概率分布

风险概率	1级	2级	3级	4级	5级
B1	0	0	0.661	0.317	0
B2	0	0.027	0.814	0.136	0
B3	0	0.019	0.826	0.132	0
B4	0	0	0.557	0.421	0
B5	0	0	0.374	0.465	0.628
B6	0	0.03	0.855	0.102	0
A1	0	0	0.344	0.634	0
A2	0	0	0.185	0.644	0.128
A3	0	0.308	0.68	0	0
S	0	0	0.069	0.78	0.128

基于表 8 和最大隶属原则获取贝叶斯网络结构节点 A1, A2 以及 A3 的概率等级分别是 4 级、4 级、3 级, 得到基坑主体施工场点风险等级是 4 级, 锚拉杆失效的概率等级是 2 级; 支撑总体失稳、围护墙体失稳、机械倒塌的发生概率是 3 级; 不对称开挖的发生概率是 4 级。

实验还检测了支护体失稳(A1)、土体变形(A2)、机械伤人(A3)3种地震因素产生的损失程度, 获取3种地震因素的损失等级分别是3级、3级和2级。基于表5的评估矩阵获取3种地震因素的评估等级分别是APLARP的最大值、APLARP的最小值以及可考虑值。

实验通过专家评分对考虑抗震约束的实验住宅施工工程风险形成概率以及风险形成后果实施打分, 实验以地下墙为例, 获取地震风险事件发生概率  $P$  以及损失值  $C$  (表 9)。

同理获取其他二级指标的风险估值矩阵, 基于 2 级指标对应的 3 级风险源指标的权重集, 获取不同二级指标的综合评判结果。进而获取不同各二级指标的风险等级评判值, 详细结果如图 3 所示。

通过获取的二级指标权重集和获得的专家评分一级风险矩阵, 对不同的二级指标实施系统评判。详见图 4。

表 9 风险可能性  $P$  与影响后果估值  $C$

Table 9 Risk probability  $P$  and impact consequence valuation  $C$

分项工程	风险事件	$P$	$C$
地下连续墙	配筋设计不足	2	3
	墙体插入不足	1	4
	土压力计算负偏差	4	3
	钢筋笼吊放不到位	2	2
	灌注混凝土质量缺陷	3	2
	墙后堆载	4	2
	地下连续墙渗漏	4	2
	遇到障碍物	4	3

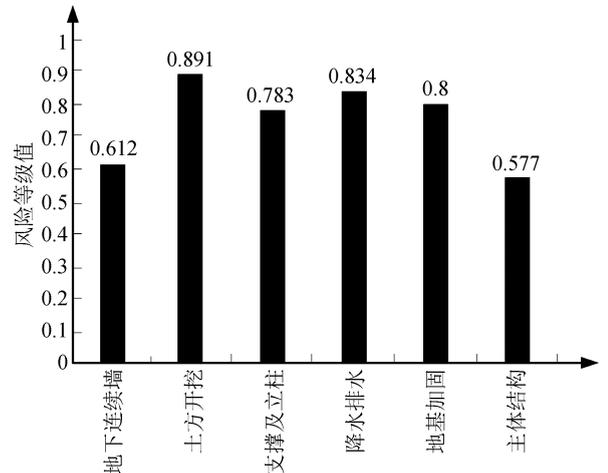


图 3 二级指标风险综合评判值柱状图

Fig.3 Histogram of risk comprehensive evaluation of second-grade indicators

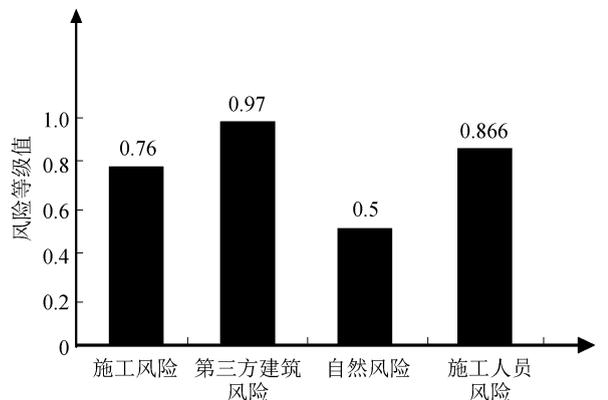


图 4 一级指标风险综合评判值柱状图

Fig.4 Histogram of risk comprehensive evaluation of first-grade indicators

实验基于上述各级指标的风险估值和风险等级, 得出建筑工程施工场点风险从大到小分别是: 总第三方建筑物风险、总施工风险、总施工人员风险、总自然风险。其中总第三方建筑风险等级最高, 同真实情况相匹配。说明所提风险评估模型较好的描

述了考虑地震约束下的建筑施工场点施工风险情况,即验证了建筑施工场点危险性建模分析方法的有效性,说明该方法能够确保总体施工的安全性,具有重要的应用价值。

### 3 结论

本文提出一种高强度地震下建筑施工场点危险性建模分析方法,该方法考虑了抗震约束,准确的获取了建筑施工场点的风险等级,对抗震约束下的基坑施工风险情况进行了准确的分析,该方法有效的解决了传统方法分析效果差的弊端,为建筑工程施工的顺利进行提供了可靠的依据。实验结果表明,所提分析方法能够较好的描述考虑地震约束下的建筑施工场点施工风险情况,但是由于未来地震的发生及震害的形成处于一个动态的背景场中,具有较大的不确定性,因此,不确定性的过渡与传递对建筑施工场点风险评估有着关键性的作用,这也是未来建筑施工场点风险评估的核心内容。

### 参考文献(References)

- [1] 车高凤,刘红玫,柴少峰,等.甘肃岷县漳县  $M_s6.6$  地震王家沟灾后重建场地滑坡危险性评价[J].地震工程学报,2016,38(增刊2):325-328.  
CHE Gaofeng,LIU Hongmei,CHAI Shaofeng, et al.Landslide Risk Assessment of Wangjiagou Post-earthquake Reconstruction Site after the Minxian—Zhangxian  $M_s6.6$  Earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(Suppl2):325-328.
- [2] 范新海,马荣全,吴晓龙,等.预制装配式混凝土结构停车楼弹塑性地震反应分析与评价[J].施工技术,2016,45(4):14-18.  
FAN Xinhai,MA Rongquan,WU Xiaolong, et al.Elastoplastic Analysis and Assessment of a New Precast Concrete Parking Structure under Earthquake Excitation[J].Construction Technology,2016,45(4):14-18.
- [3] 李圣,程永锋,卢智成,等.支柱绝缘子互连体系地震易损性分析[J].中国电力,2016,49(4):61-66.  
LI Sheng,CHENG Yongfeng,LU Zhicheng, et al.Seismic Fragility Analysis of Connected Post Insulators[J].Electric Power,2016,49(4):61-66.
- [4] 王煦,董军,焦驰宇.纵向碰撞下 FPS 隔震曲线桥地震响应分析[J].工程抗震与加固改造,2016,38(2):115-120.  
WANG Xu,DONG Jun,JIAO Chiyu.Seismic Response Analysis of FPS Isolated Curved Bridge with Longitudinal Collision[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2016,38(2):115-120.
- [5] Salgado-Gálvez M A,Zuloaga-Romero D,BERNAL G A, et al.

- Fully Probabilistic Seismic Risk Assessment Considering Local Site Effects for the Portfolio of Buildings in Medellín, Colombia [J].Bulletin of Earthquake Engineering,2014,12(2):671-695.
- [6] 高欣,吴晓伟,田俊.轻骨料混凝土剪力墙非线性有限元模型的构成及其抗震性能的因素[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(5):1428-1435.  
GAO Xin,WU Xiaowei,TIAN Jun, et al.Structure of Nonlinear Finite Element Model of Lightweight Aggregate Concrete Share Wall and the Factors Affecting Seismic Performance[J].Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2015,45(5):1428-1435.
- [7] 姜绍飞,吴铭昊,唐伟杰,等.古建筑木结构多尺度建模方法及抗震性能分析[J].建筑结构学报,2016,37(10):44-53.  
JIANG Shaofei,WU Minghao,TANG Weijie, et al.Multi-scale Modeling Method and Seismic Behavior Analysis for Ancient Timber Structures[J].Journal of Building Structures,2016,37(10):44-53.
- [8] 焦其松,张景发,蒋洪波,等.基于 TLS 技术的典型建筑物震害信息三维建模分析——以彭州市白鹿中学为例[J].国土资源遥感,2016,28(1):166-171.  
JIAO Qisong,ZHANG Jingfa,JIANG Hongbo, et al.Typical Earthquake Damage Extraction and Three-dimensional Modeling Analysis Based on Terrestrial Laser Scanning: A Case Study of Bailu Middle School of Pengzhou City[J].Remote Sensing for Land & Resources,2016,28(1):166-171.
- [9] ARGYROUDIS S,SELVA J,GEHL P, et al.Systemic Seismic Risk Assessment of Road Networks Considering Interactions with the Built Environment[J].Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,2015,30(7):524-540.
- [10] 周浩,李杰.基于不同本构模型的混凝土结构地震倒塌对比分析[J].建筑结构学报,2016,37(9):8-18.  
ZHOU Hao,LI Jie.Comparison Study on Seismic Collapse of Concrete Structures with Different Constitutive Models[J].Journal of Building Structures,2016,37(9):8-18.
- [11] 倪明杨.基于物元分析理论高层建筑施工安全风险评估[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2016,38(3):293-296.  
NI Mingyang.Construction Safety Risk Assessment of High-rise Building Based on Matter Element Analysis[J].Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering),2016,38(3):293-296.
- [12] 王春雪,吕淑然.建筑施工作业安全感知影响因素研究[J].中国安全科学学报,2016,26(5):13-18.  
WANG Chunxue,LÜ Shuran.Research on Factors Affecting Sense of Safety in Construction Operations[J].China Safety Science Journal,2016,26(5):13-18.
- [13] 李艳芳.边坡高层建筑施工中基坑排桩方案的优化及分析[J].科技通报,2017,33(4):92-96.  
LI Yanfang.Optimization and Analysis of Foundation Pit Pile in Slope High-rise Building Construction Scheme[J].Bulletin

of Science and Technology, 2017, 33(4): 92-96.

- [14] HIMOTO K, SUZUKI K. Probabilistic Fire Risk Assessment of a Mid-Rise or High-rise Building with Fire Safety Equipment Systems Damaged by Seismic Shaking[J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 81(728): 855-863.

- [15] 陈长云, 贺建明. 巴颜喀拉块体东部及邻区块体边界断裂变形

特征及其强震危险性分析[J]. 震灾防御技术, 2016, 11(3): 448-462.

CHEN Changyun, HE Jianming. Seismic Risk and Deformation Characteristics of the Boundary Faults in the Eastern Bayan Har Block and its Adjacent Regions[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2016, 11(3): 448-462.

\*\*\*\*\*  
(上接第 720 页)

MENG Yi. Experiment and Numerical Simulation Study on Reinforced Concrete Beam under Impact Loading[D]. Changsha: Hunan University, 2012.

- [21] 樊建平, 章建军, 陈传尧. 用显格式技术对复杂结构准静态加载的有限元模拟[J]. 计算力学学报, 2002, 19(4): 431-437.

FAN Jianping, ZHANG Jianjun, CHEN Chuanyao. Finite Element Simulation of Quasi-static Loading of Complex Structures by Explicit Technique[J]. Journal of Computational Mechanics, 2002, 19(4): 431-437.

- [22] 黄志辉, 陈盛钊, 柏友运. 显式准静态几种加载方法的讨论[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(6): 122-125.

HUANG Zhihui, CHEN Shengzhao, BAI Youyun. Discussion of Explicit Quasi-static Loading Method[J]. Journal of Wuhan

University of Technology, 2011, 33(6): 122-125.

- [23] 王英, 顾祥林, 林峰. 考虑压拱效应的钢筋混凝土双跨梁竖向承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 32-42.

WANG Ying, GU Xianglin, LIN Feng. Vertical Bearing Capacity of RC Two-bay Beams Considering Compressive Arch Action[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 32-42.

- [24] 李易, 陆新征, 叶列平. 基于能量方法的 RC 框架结构连续倒塌抗力需求分析 II: 悬链线机制[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 9-16.

LI Yi, LU Xinzheng, YE Lieping. Progressive Collapse Resistance Demand of RC Frame Structures Based on Energy Method II: Catenary Mechanism [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 9-16.