

文章编号:1671-6833(2020)03-0062-05

# 基于 WBS-RBS 和 AHP 的港珠澳大桥人工岛建设风险分析

李宗坤,王 特,葛 巍,宋子元

(郑州大学 水利科学与工程学院,河南 郑州 450001)

**摘 要:**针对港珠澳大桥人工岛建设系统复杂、不确定因素多的问题,运用 WBS-RBS 方法对该工程进行项目结构分解和风险分解,构建了 WBS-RBS 风险识别矩阵。采用层次分析法和风险度理论计算各指标层的权重和风险度,并对该工程进行了风险评价。结果表明:港珠澳大桥人工岛建设总体风险水平为 3 级中等风险,与工程实际相符合,说明该方法是合理可行的,可为类似工程建设风险评价体系的构建提供借鉴和参考。

**关键词:**人工岛;港珠澳大桥;层次分析法;风险因素;权重;风险度

**中图分类号:**TV512 **文献标志码:**A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.019

## 0 引言

人工岛建设相比于内陆工程建设,具有施工环境复杂、不确定因素多及技术难度高等特点。考虑到此类工程规模庞大、安全指标要求高且管理困难,必须对工程进行系统的风险分析,识别出各工作阶段的风险因素,并作出综合性评价。

国内对于人工岛建设风险的研究取得了较多的成果。宋君妍等<sup>[1]</sup>通过对人工岛开发建设过程的风险分析与对策研究,提出了有效的风险预防及控制措施。冯民学等<sup>[2]</sup>对洋口港区人工岛进行了雷击风险计算和风险区等级划分。王彦林等<sup>[3]</sup>对港珠澳大桥东、西人工岛施工图设计进行了风险评估,详细讨论了安全风险的防范建议。以上大多注重于整体工程的综合评价,对于各分项工程风险识别方法的思考并不明确。WBS-RBS 是一种广泛应用于风险分析的方法,已在较多实际工程的风险评价中得到了应用。陈国华等<sup>[4]</sup>运用 WBS-RBS 方法对跨海桥梁施工作业和风险层次进行了分解,确定出了对应工程的风险等级和主要影响因素。贾俊峰等<sup>[5]</sup>通过构建 WBS-RBS 结构提高了土建工程施工风险评估的准确性。笔者结合港珠澳大

桥人工岛工程实例,运用 WBS-RBS 风险辨识方法和 AHP 方法计算并分析工程建设过程中的风险因素及权重,并按照风险度理论及风险标准对各阶段风险水平进行综合评价,详细分析了各分项工程中的风险因素,规避了其他方法分析不全面的弊端,使该工程的风险识别更加清晰和直观,从而提高风险评价结果的可靠性。

## 1 工程概况

港珠澳大桥东西人工岛是连接东西桥梁和海底隧道的重要结合点,更是集办公、监控、隧道救援养护等多功能为一体的综合项目,为港珠澳大桥工程全线路段的重点配套项目。东、西人工岛均采用椭圆形布设,东人工岛岛长 625 m,宽 225 m,总面积为 10.316 万 m<sup>2</sup>;西人工岛岛长 625 m,宽 185 m,总面积为 9.796 万 m<sup>2</sup>。

由于人工岛施工范围内有 800 万吨海床淤泥,施工团队采用了“钢筒围岛”方案:在陆地上预先制造 120 个直径 22.5 m、高度 55 m、重量达 550 t 的巨型圆形钢筒,通过船只将其直接固定在海床上,然后在钢筒合围的中间区域进行填土造岛,其施工工法和八锤联动液压振动锤为世界首创<sup>[6]</sup>。人工岛分别通过岛桥结合部和岛隧结合部实现与桥、隧的连接。

收稿日期:2019-10-12;修订日期:2020-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51709239,51679222)

作者简介:李宗坤(1961—),男,河南邓州人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事水利工程风险评价与管理研究,E-mail: lizongkun@zzu.edu.cn。

2 风险识别

港珠澳大桥人工岛建设地处外海,技术新、经验少,不确定因素较多,容易引起风险的因素也很多,同一风险因素在不同的建设阶段中也会不同。基于各风险因素的时效性和动态特性,对工程分别进行项目结构分解和风险分解,并构造 WBS-RBS 矩阵对人工岛建设过程中可能存在的风险进行识别。

项目分解(WBS)<sup>[7-8]</sup>是从全局出发,将一个整体项目分解成若干个相互独立、易于描述的作业单元,可以深入了解和牢牢把握项目实施

的具体细节。项目分解的方法比较灵活,可以从实施过程、空间位置、功能或要素等方面入手进行分解。考虑到港珠澳大桥人工岛建设项目的特点,按实施过程进行 WBS 分解,如图 1 所示。

风险分解(RBS)<sup>[7-8]</sup>是将工程实施过程中可能遇到的风险逐层分解,从而得到不同层次的子风险。在参照相关工程的基础上,充分考虑各方面致险因素,并结合生态文明建设思想,将风险分解为自然环境风险、海洋工程风险、岛内施工风险、环境污染风险和其他风险共 5 大类,并逐层进一步分解,如图 2 所示。

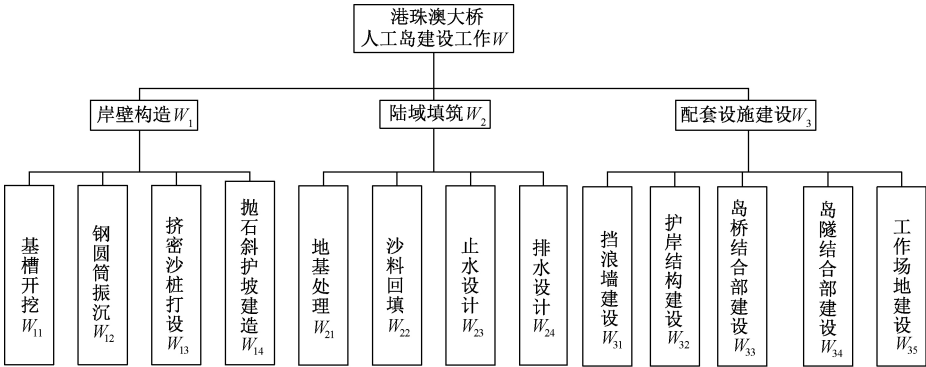


图 1 港珠澳大桥人工岛建设 WBS 分解结果

Figure 1 Result of WBS decomposition of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

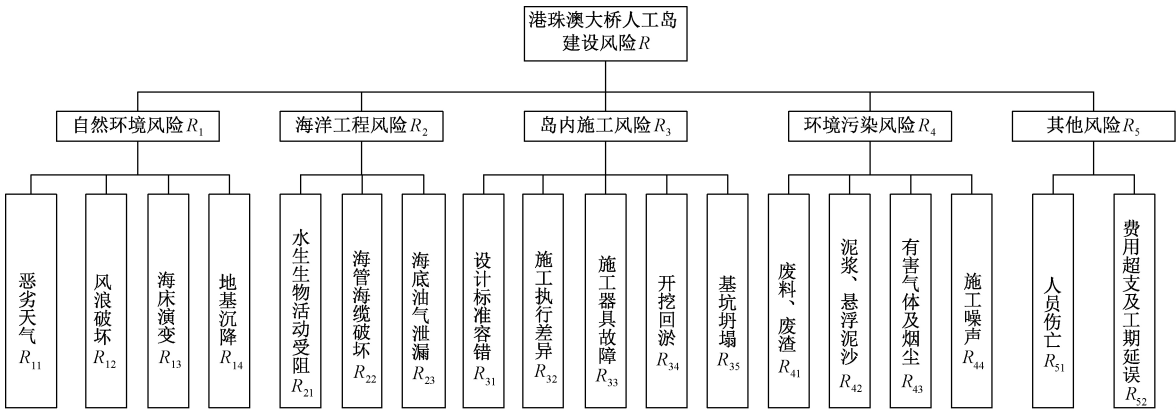


图 2 港珠澳大桥人工岛建设 RBS 分解结果

Figure 2 Result of RBS decomposition of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

为充分考虑港珠澳大桥人工岛建设工作的实际需要,并使分解结果便于计算,可建立 WBS-RBS 风险识别矩阵,对各级子工作中所存在的风险因素进行有效识别和清晰反馈,进而全方位、多角度地反映该建设过程中的风险状况。

基于以上理论,构造 WBS-RBS 风险识别矩

阵  $A$ 。矩阵  $A$  的列分别对应各 2 级子工作,行分别对应各 2 级子风险。对于确实存在的风险因素,矩阵对应元素设为 1。对于比较模糊、可能存在的风险项,也认定其存在,然后根据后期的专家打分确定其权重和重要性。而对于子工作中几乎不可能发生的或对整个工程影响甚小的风险项,则可进行忽略,即将对应元素设为 0。

A =

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

3 风险计算

3.1 层次分析法

层次分析法(AHP)<sup>[9]</sup>适用于定性问题的定量分析,可以将复杂问题逐层分解为更加系统、直观的递阶层次结构。结合 WBS-RBS 判断矩阵,采用层次分析法,确定各分项元素相对于目标的重要程度。具体实施过程如下:

(1)构建各风险元素相对于准则层的判断矩阵:

$$B = (b_{ij})_{n \times n}, \tag{1}$$

式中: $b_{ij}$ 表示对于上一层对象而言,风险因素  $R_i$  相对于  $R_j$  的重要程度。

$b_{ij}$ 取值可根据美国运筹学家 T.L.Saaty 提出的 1~9 标度法则来确定<sup>[7]</sup>。 $b_{ij}$ 具体取值及意义见表 1。若  $i=j$ ,则  $b_{ij}=1$ ;反之, $b_{ji}=1/b_{ij}$ 。

表 1  $b_{ij}$ 取值及意义

Table 1 Value and significance of $b_{ij}$	
$b_{ij}$ 取值	意义
1	$i$ 与 $j$ 一样重要
3	$i$ 比 $j$ 稍微重要
5	$i$ 比 $j$ 明显重要
7	$i$ 比 $j$ 强烈重要
9	$i$ 比 $j$ 极其重要
2,4,6,8	上述中间状态的对应取值

(2)根据判断矩阵  $B$ ,确定各准则下风险因

素的相对权重。首先求出判断矩阵  $B$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$ ,再求出最大特征值对应的特征向量  $U=(u_1,u_2,\cdots,u_n)$ ,并对该特征向量进行归一化处理得到向量  $V,V=(v_1,v_2,\cdots v_n)$ 。归一化处理后向量中的值即为其对应元素的相对权重<sup>[10]</sup>。向量  $V$  的计算如式(2)所示:

$$v_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^n u_i}。 \tag{2}$$

(3)利用一致性指标  $CR$  对矩阵进行一致性检验。当  $CR$  小于 0.1 时,认为判断矩阵的一致性满足要求<sup>[11]</sup>。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}; \tag{3}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}, \tag{4}$$

式中: $CI$  为相容性指标; $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值; $n$  为判断矩阵的阶数; $RI$  为随机性指标,可参照美国运筹学家 T.L.Saaty 给定的矩阵阶数与随机性指标参考值<sup>[12]</sup>,见表 2。

表 2 随机性指标  $RI$  取值

Table 2 Value of the mean random consistency index  $RI$

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
$RI$	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41

3.2 风险度理论

风险度<sup>[11]</sup>是一种量化地描述风险概率以及损失程度的分析方法。此方法认为风险度  $D$  可以根据该风险发生的可能性程度  $L$  和所造成的损失程度  $C$  来确定,其计算公式为:

$$D = L \times C, \tag{5}$$

式中: $L$ 、 $C$  的取值为 1~5,其具体取值所对应的含义见表 3; $D$  的取值可反映风险的等级,这里采用 5 级风险标准来划分风险等级<sup>[13]</sup>,具体取值及描述见表 4。

表 3  $L$  和  $C$  取值及含义

Table 3 Value and description of  $L$  and  $C$

取值	$L$ 值含义	$C$ 值含义
1	几乎不会发生	几乎不引起损失
2	发生可能性较小	引起较小损失
3	可能会发生	引起一般损失
4	发生可能性较大	引起较大损失
5	极易发生	引起巨大损失

鉴于专家打分法是构建风险判断矩阵及风险度计算的重要环节和依据,在具体评估时应选择具有丰富的外海造岛理论知识和工作经验的专家

表 4 风险等级  $D$  取值及语言描述

Table 4 Value of risk rank $D$ and description		
$D$ 取值	风险等级	风险水平
1 ~ 3	1 级	低风险
3 ~ 6	2 级	较低风险
6 ~ 10	3 级	中等风险
10 ~ 16	4 级	较高风险
16 ~ 25	5 级	高风险

进行打分,以实际调研资料和现有成果为依托,充分论证各风险因素对工程目标的影响程度。

3.3 港珠澳大桥人工岛建设风险度计算

港珠澳大桥人工岛建设各层因素权重和风险度计算具体步骤如下:

(1)以矩阵  $A$  的风险识别结果为依据,运用专家打分法对各 2 级子工作中的风险因素进行两两比较,构建判断矩阵,并进行一致性检验,进而确定出各风险因素相对于 2 级子工作的权重。

(2)根据表 3 中  $L$ 、 $C$  的取值及相应含义,咨询专家并查阅相关资料,对各参数进行赋值,进而计算各 2 级子风险相对于各 2 级子工作的风险度。

(3)由各 2 级子风险的权重及对应的风险度进行加权运算,得出各 2 级子工作的风险度,公式如下:

表 5 各级工作风险度及权重计算结果

Table 5 Calculation result of risk degree and weight in each work					
1 级子工作	1 级子工作权重	1 级子工作风险度	2 级子工作	2 级子工作权重	2 级子工作风险度
岸壁构造 $W_1$	0.539	6.143	基槽开挖 $W_{11}$	0.097	8.280
			钢圆筒振沉 $W_{12}$	0.543	5.635
			挤密沙桩打设 $W_{13}$	0.255	5.809
			抛石斜护坡建造 $W_{14}$	0.103	7.634
陆域填充 $W_2$	0.163	7.013	地基处理 $W_{21}$	0.280	6.373
			沙料回填 $W_{22}$	0.140	11.549
			止水设计 $W_{23}$	0.339	6.210
			排水设计 $W_{24}$	0.239	6.241
配套设施建设 $W_3$	0.297	9.344	挡浪墙建设 $W_{31}$	0.054	6.223
			护岸结构建设 $W_{32}$	0.107	9.472
			岛桥结合部建设 $W_{33}$	0.213	9.490
			岛隧结合部建设 $W_{34}$	0.505	10.160
			工作场地建设 $W_{35}$	0.119	6.924

4 风险评价

由表 5 可以看出,在岸壁构造工作中,基槽开挖  $W_{11}$  的风险度最高;陆域填充工作中,沙料回填  $W_{22}$  的风险度最高;配套设施建设工作中,岛隧结合部建设  $W_{34}$  的风险度最高。

$$D_{ij} = \sum_{l=1}^n \lambda_{ijl} D_{ijl}, \tag{6}$$

式中:  $D_{ij}$  表示对应工作的风险度;  $\lambda_{ijl}$  表示各风险因素在所属工作下的相对权重;  $D_{ijl}$  表示各风险因素在所属工作下的风险度;  $n$  为各子工作中所包含的风险因素个数。

(4)根据步骤(3)中各 2 级子工作的权重及风险度,再次进行加权运算,求出各 1 级子工作的风险度,以此类推,最终求出该工程的总风险度。

限于文章篇幅,仅以“钢圆筒振沉”(  $W_{12}$  ) 这个 2 级子工作为例,来说明此方法的应用。由矩阵  $A$  可知,  $W_{12}$  中所具有的风险因素有  $R_{11}$ 、 $R_{21}$ 、 $R_{22}$ 、 $R_{23}$ 、 $R_{33}$ 、 $R_{42}$ 、 $R_{44}$ , 对此 7 项风险因素进行整理并打分,构建判断矩阵。计算该判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量,由式(3)和(4)计算出一致性指标为 0.051,说明该矩阵一致性满足要求。对该判断矩阵最大特征值所对应的特征向量进行归一化处理,得各 2 级子风险相对于 2 级子工作  $W_{ij}$  的权重分别为 0.050、0.044、0.204、0.434、0.166、0.069、0.030。采用专家打分法并由式(5)计算出各子风险的风险度分别为 8、9、3、4、12、6、8,则 2 级子工作  $W_{12}$  的风险度为 5.635。以此类推,可求出所有 2 级子工作的权重,见表 5。

态。其中,2 级子工作沙料回填  $W_{22}$ 和岛隧结合部建设  $W_{34}$ 的风险水平为 4 级较高风险,需要给予重点关注。

5 结束语

港珠澳大桥人工岛建设工程系统庞大、技术难度高。通过构造 WBS-RBS 矩阵,将该工程进行项目结构分解和风险分解,并对项目建设过程中各风险因素进行识别和重要性比较,运用 AHP 方法对各风险因素进行定量计算,确定其权重和各级子工作的风险度,进而计算出该工程总体风险度和风险等级。评价结果和工程调研结果基本一致,可为其他同类工程的风险识别、定量分析和风险防范措施的制定提供借鉴。

此外,工程建设过程中各风险因素的相对重要性是随工程的推进不断变化的,可在风险分析中引入时间因素,使风险评价结果更加科学可靠。

参考文献:

[1] 宋君妍,许朝旭,桑大钊. 油田人工岛开发建设风险控制措施分析[J]. 安全、健康和环境, 2013, 13 (1):45-49.

[2] 冯民学,焦雪,钟颖颖,等. 江苏洋口港区雷电特性及风险区划[J]. 气象科学, 2012, 32(1):86-93.

[3] 王彦林,吴泽生. 港珠澳大桥东、西人工岛施工图设计安全风险评估[J]. 施工技术, 2013, 42(11): 64-68.

[4] 陈国华,吴武生,徐三元,等. 基于 WBS-RBS 与 AHP 的跨海桥梁工程施工 HSE 风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(9):51.

[5] 贾俊峰,梁青槐. WBS-RBS 与 AHP 方法在土建工程施工安全风险评估中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(7):101.

[6] 王彦林,闫禹. 港珠澳大桥外海人工岛快速成岛技术[J]. 施工技术, 2012, 41(8):47-51.

[7] 田林钢,马成功,王绪. 基于 AHP-熵权法的水利工程业主风险模糊评价[J]. 人民黄河, 2017, 39 (12):117-122.

[8] LI Z K, WANG T, GE W, et al. Risk analysis of earth-rock dam breach based on dynamic bayesian network[J]. Water, 2019, 11(11): 2305.

[9] 葛巍,李宗坤,王文姣,等. 基于 WBS-RBS 和 AHP 的土石坝施工期风险评估[J]. 人民黄河, 2013, 35 (6):121-123.

[10] 项贻强,吴强强,张婷婷. 基于 AHP-FCE 模型的桥梁设计风险评估研究[J]. 土木工程学报, 2010,43 (S2):275-280.

[11] 李宗坤,张亚东,宋浩静,等. 基于施工进度计划的建设工程施工工期风险分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6):204-212.

[12] 刘铮,吴小萍,杨立国. 层次分析法及消去与选择转换法在铁路环评中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2007, 28(3):56-60.

[13] 李宗坤,吴赛,李定斌,等. 南水北调中线工程潮河段征迁安置风险分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(4):57-61.

Risk Analysis of Artificial Island Construction of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Based on WBS-RBS and AHP Methods

LI Zongkun, WANG Te, GE Wei, SONG Ziyuan

(School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In view of the the complexity and uncertainty of construction system of artificial island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge, the WBS-RBS method was used to decompose the project structure and risk. The AHP method and risk degree theory were used to calculate the weight and risk degree of each index layer, and the risk evaluation of the project was carried out. The results showed that the overall risk level of the artificial island construction of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge was 3-level medium risk, which was in line with the actual project, indicating that the method was reasonable and feasible, and could cast extra light on the construction of similar project risk assessment system.

**Key words:** artificial island; Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge; AHP; risk factor; weight; risk degree