

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.006

# 基于模糊故障树理论的双壁钢围堰水中墩 施工风险分析

刘沐宇,荆武,张睿智

(武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室,武汉 430070)

**摘要:**运用模糊故障树理论对双壁钢围堰水中墩施工风险进行分析,提出双壁钢围堰水中墩施工风险模糊故障树评价方法。依托武汉鹦鹉洲长江大桥重大工程,以2#墩双壁钢围堰水中墩施工过程中风险分析为研究对象,选取影响其施工风险的31个底事件,构建了双壁钢围堰水中墩施工风险分析模糊故障树,明确了施工风险的关键工序,提出了相应的防范措施。结果表明:双壁钢围堰水中墩施工风险发生概率的模糊数为(0.05015,0.05278,0.05542),表明2#水中墩施工风险比较大,焊缝渗漏、断桩、出现涌砂现象为施工风险较大的关键工序,必须采取相应的防范措施以降低双壁钢围堰水中墩的施工风险。

**关键词:**鹦鹉洲长江大桥;模糊故障树;双壁钢围堰;施工风险

**中图分类号:**TU745 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)06-0034-07

## Analysis of Construction Risk for Water Piers and Foundations with Double-wall Steel Cofferdam Based on the Fuzzy Fault Tree Theory

Liu Muyu, Jing Wu, Zhang Ruizhi

(Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China)

**Abstract:** Construction risk for water piers and foundations with double-wall steel cofferdam was analyzed by the fuzzy fault tree theory. An evaluation method of construction risk for water piers and foundations with double-wall steel cofferdam was proposed. Fuzzy fault tree of construction risk for water piers and foundations with double-wall steel cofferdam was established based on Yingwuzhou Yangtze River Bridge. 31 bottom events were considered in fuzzy fault tree model according to 2# water pier and foundation with double-wall steel cofferdam. Key process of construction risk was obtained and risk prevention measures were proposed. Results showed that fuzzy number of construction risk probability for water piers and foundations with double-wall steel cofferdam was (0.05015, 0.05278, 0.05542). Construction risk of 2# water pier was highest. And weld leakage, pile broken and sand boiling were the key processes with higher construction risk. Therefore appropriate prevention measures would be taken to reduce the construction risk for water piers and foundations with double-wall steel cofferdam.

**Key words:** yingwuzhou yangtze River Bridge; fuzzy fault tree; double-wall steel cofferdam; construction risk

收稿日期:2014-05-06

基金项目:高等学校博士点专项基金(20110143110016);武汉市科技攻关项目(201160923308)

作者简介:刘沐宇(1963-),博士,教授,博导,主要从事桥梁工程教学与科研工作,(E-mail)liumuyu@whut.edu.cn。

采用双壁钢围堰水中墩施工是大型桥梁基础施工过程中风险发生概率高、事故危害性大的关键施工阶段<sup>[1]</sup>。武汉鹦鹉洲长江大桥2#墩水中基础施工采用双壁钢围堰施工工艺,在钢围堰的制作、下河、浮运、下沉、接高等工序中均存在多种施工风险,任何一个施工环节出现较大风险事故都将影响到水中墩的安全施工,对国家财产和人民生命安全将造成重大损失。因此开展双壁钢围堰水中墩施工风险分析并提出相应的防范措施是十分必要的。

桥梁施工风险分析研究工作是当前桥梁工程领域的研究热点。阮欣等<sup>[2]</sup>针对现阶段国内外大型桥梁工程风险问题,建立了桥梁工程的风险评估体系。娄峰等<sup>[3]</sup>根据国内外桥梁施工事故案例分析,指出大型桥梁钢围堰水中墩施工是事故多发阶段之一,必须加以重点防范。Ali等<sup>[4]</sup>建立施工过程中火灾发生模型,定量分析施工火灾发生机理。Jozc等<sup>[5]</sup>运用模糊数学与迭代理论建立广义模型并计算了事故发生概率的逼近值。Zhang等<sup>[6]</sup>以泰州长江大桥施工为依托,运用层次分析法结合模糊综合评价法建立了大型桥梁施工风险评价模型。杨伟军等<sup>[7]</sup>根据桥梁施工风险的不确定性和模糊性的特点,提出了一种基于云理论模型的桥梁施工风险评价方法。

鉴于双壁钢围堰水中墩施工风险存在模糊性,本文基于模糊故障树理论,以武汉鹦鹉洲长江大桥双壁钢围堰2#水中墩施工风险分析为研究对象,提出双壁钢围堰水中墩施工风险模糊故障树评价方法。选取影响其施工风险的31个底事件,构建了双壁钢围堰水中墩施工风险分析模糊故障树,明确了施工风险的关键工序,给出了相应的防范措施,研究结果不仅对武汉鹦鹉洲长江大桥水中墩施工风险防范有指导意义,对其它大型桥梁施工风险分析也有一定的借鉴作用。

## 1 模糊故障树理论

故障树分析法以系统不希望发生的事件(顶事件)作为分析目标,通过对故障原因的逐层次分解,获得故障原因之间的逻辑关系,并构建故障原因的树形图,如图1所示,最后利用故障树模型定量计算顶事件的发生概率。由于实际的很多事故原因具有不确定性和模糊性,故将模糊数学理论引入到故障树分析中,将底事件的发生概率作为模糊数进行处理,通过模糊数学运算获得顶事件的发生概率<sup>[8-12]</sup>。

故障树计算建立在“与”门和“或”门的运算之上。“与”门表示所有输入事件都发生时会导致逻辑与门的输出事件发生。“或”门表示全部输入事件中至少一个发生时就会导致逻辑或门的输出事件发生。对于“与”门可以通过式(1)计算出相对顶事件的概率。对于“或”门可以通过式(2)计算出相对

顶事件的概率。

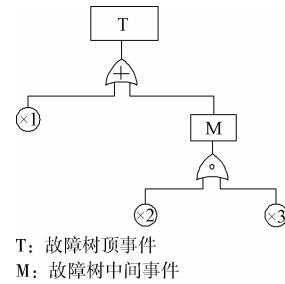


图1 故障树系统图

$$P_{\text{and}} = \prod_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

$$P_{\text{or}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (2)$$

式中:  $p_i$  表示底事件发生概率;  $p_{\text{and}}$  表示“与”门组成的顶事件发生概率;  $p_{\text{or}}$  表示“或”门组成的顶事件发生概率。

模糊集合不同于经典集合,其不能绝对地区别“属于”或“不属于”,就是说论域上的元素符合概念的程度不是绝对的0或1,而是介于0和1之间的一个实数。设A为论域U上的一个模糊集,则A的隶属函数

$$u_A(x) \rightarrow [0,1] x \in U \quad (3)$$

式中:  $u_A(x)$  为将U中的元素映射到[0,1]中的实数。

底事件的发生概率用三角形模糊数表示时,其隶属函数为

$$u_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ (x-a)/(m-a) & a \leq x \leq m \\ (b-x)/(b-m) & m \leq x \leq b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $a, b$  为模糊数的左、右分布参数,表示函数向左和向右延伸的程度;  $m$  为对应于隶属函数为1的数。三角模糊数可由  $a, m, b$  3个参数表示,记为

$p(x) = (a, m, b)$ , 设  $p_1(x) = (a_1, m_1, b_1)$ 、 $p_2(x) = (a_2, m_2, b_2)$ , 则模糊数

$$(a_1, m_1, b_1) \oplus (a_2, m_2, b_2) = (a_1 + a_2, m_1 + m_2, b_1 + b_2) \quad (5)$$

$$(a_1, m_1, b_1) \otimes (a_2, m_2, b_2) = (a_1 a_2, m_1 m_2, b_1 b_2) \quad (6)$$

式中:  $p(x), p_1(x), p_2(x)$  为相应事件发生概率。

则对于三角模糊数,运算式如式(7)、(8)所示。

$$P_{\text{and}} = \left[ \prod_{i=1}^n a_i, \prod_{i=1}^n m_i, \prod_{i=1}^n b_i \right] \quad (7)$$

$$P_{\text{or}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) = \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - a_i) \right],$$

$$\left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i)\right], \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - b_i)\right] \quad (8)$$

## 2 工程实例分析

### 2.1 工程背景

武汉鹦鹉洲长江大桥 2# 水中墩基础施工采用双壁钢围堰施工工艺,壁厚 2.0 m,圆端型布置,封底混凝土厚 8 m。2# 水中墩基础围堰标高为 9.0 m,围堰高 35.5 m,如图 2 所示。

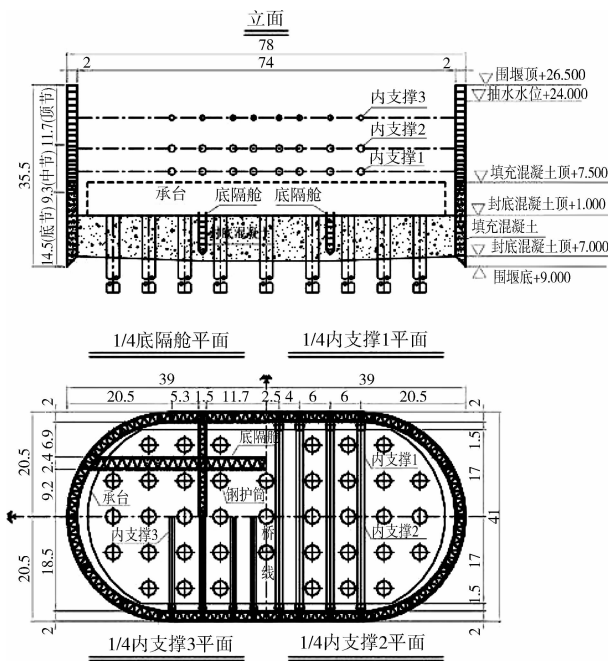


图 2 2# 水中墩钢围堰布置图(单位:m)

### 2.2 双壁钢围堰施工风险模糊故障树建立

引起双壁钢围堰水中墩施工事故的因素很多,根据其施工工艺和流程(如图 3 所示),确定主要的影响因素。通过影响因素构建双壁钢围堰施工风险模糊故障树,如图 4 所示。以双壁钢围堰水中墩基础施工事故为顶事件,将双壁钢围堰施工、钻孔桩施工、承台混凝土施工作为 3 个主要中间事件。并进一步提出它们的风险影响因素,最后明确各自的底事件风险影响因素,根据模糊故障树分析法中的“与门”和“或门”的逻辑关系形成双壁钢围堰水中墩施工故障树。本文提出了双壁钢围堰水中墩施工 31 个影响因素为故障树的底事件。

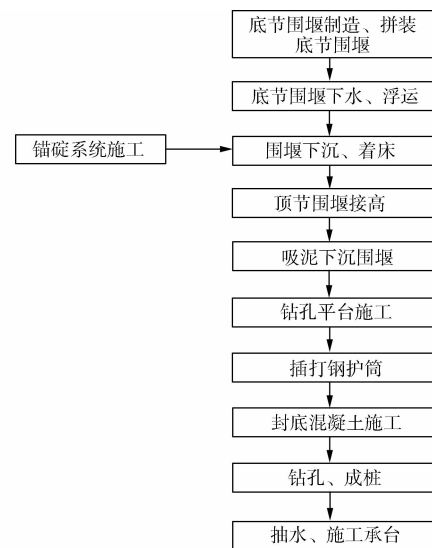


图 3 双壁钢围堰水中墩施工流程

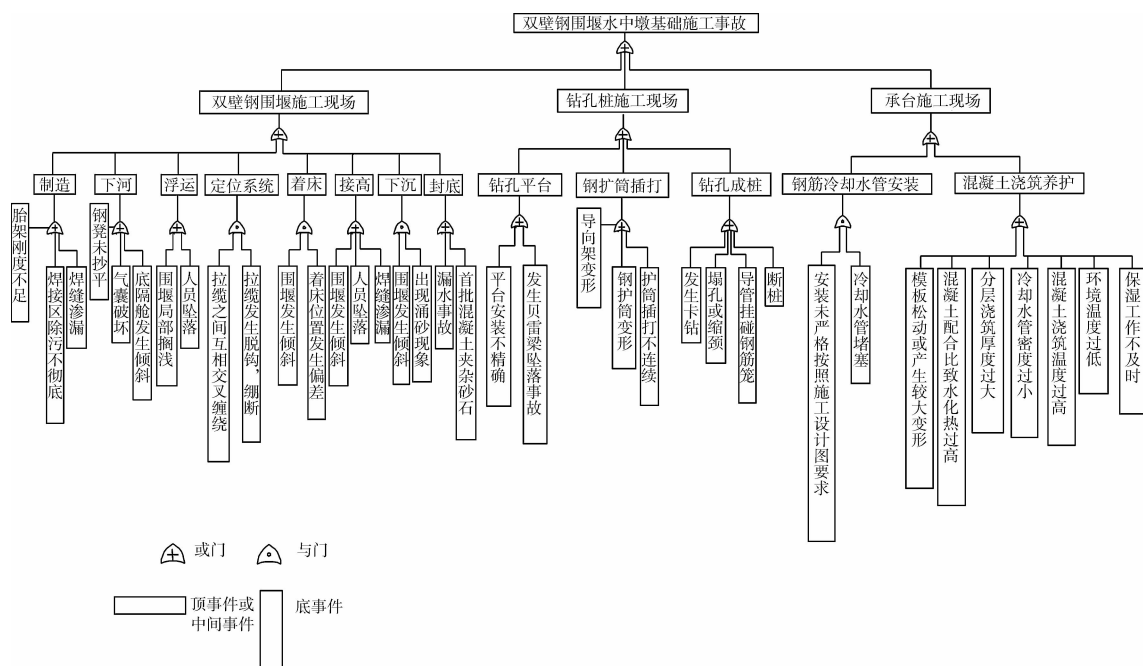


图 4 双壁钢围堰水中墩施工故障树

2.3 影响因素的定性分析

由表 1 列出,共计 31 个。

双壁钢围堰水中墩施工风险模糊故障树底事件

表 1 双壁钢围堰水中墩施工风险底事件列表

编号	故障树事件	编号	故障树事件	编号	故障树事件	编号	故障树事件
T	2#墩基础施工事故	P1	钻孔平台安装	X8	人员坠落	X20	卡钻
M1	双壁钢围堰施工现场	P2	钢护筒插打	X9	拉缆交叉缠绕	X21	塌孔,缩颈
M2	钻孔桩施工现场	P3	钻孔成桩	X10	拉缆脱钩,绷断	X22	导管挂碰钢护筒
M3	承台施工现场	Q1	钢筋冷却水管安装	X11	围堰着床时倾斜	X23	断桩
N1	围堰制造	Q2	混凝土浇筑养护	X12	围堰着床位置偏差	X24	冷却水管堵塞
N2	围堰下河	X1	胎架刚度不足	X13	出现涌砂现象	X25	模板松动变形
N3	围堰浮运	X2	焊接区除污不彻底	X14	封底混凝土夹渣砂石	X26	混凝土配合比不恰当
N4	围堰定位系统	X3	焊缝渗漏	X15	平台安装偏差	X27	分层浇筑厚度过大
N5	围堰着床	X4	钢凳未抄平	X16	平台贝雷梁坠落	X28	混凝土浇筑温度过高
N6	围堰节高	X5	气囊破坏	X17	导向架变形	X29	环境温度过低
N7	围堰下沉	X6	底隔舱倾斜	X18	钢护筒变形	X30	保湿工作不及时不充分
N8	围堰封底	X7	围堰局部搁浅	X19	钢护筒插打不连续	X31	无安全培训

在模糊故障树分析方法中,需要将底事件与中间事件按照故障树的结构模型进行布尔运算,从而获得计算顶事件概率的最小割集,所谓割集是指引起顶事件发生的相互独立的基本底事件集合。

通过布尔运算,武汉鹦鹉洲长江大桥 2#水中墩施工风险模糊故障树的最小割集有 28 个,其中单因素最小割集有 17 个,分别为: {X3}、{X7}、{X8}、{X11}、{X14}、{X15}、{X16}、{X20}、{X21}、{X22}、{X23}、{X26}、{X27}、{X28}、{X29}、{X30}、{X31}。双因素最小割集有 11 个,分别为: {X1X2}、{X1X3}、{X4X5}、{X4X6}、{X9X10}、{X11X12}、{X11X13}、{X17X18}、{X17X19}、{X15X24}、{X25X30}。双因素最小割集表示,当两个底事件同时发生时可能引起顶事件的发生。例如胎架刚度不足(X1),焊缝渗漏(X3)同时发生时,将会引起钢围堰渗漏事故发生。

2.4 影响因素的定量分析

1)底事件的概率确定

采用专家打分法对模糊故障树底事件进行打分<sup>[13-14]</sup>,具体的实施步骤是:将上述模糊故障树中的 31 个底事件以问卷调查的方式请武汉鹦鹉洲长江大桥现场施工技术人员(共 20 份),分别赋予一定的分值,分值的大小与底事件发生概率的关系见表 2。31 个底事件的发生概率  $m$ ,根据 20 份问卷进行统计求得均值后确定。并根据公式(3)、(4)确定模糊数的左、右分布参数  $a$ 、 $b$ 。本文按照误差估计范围为  $\pm 5\%$  来确定底事件模糊数的上限和下限; $a_i =$

$0.95m_i$ 、 $b_i = 1.05m_i$ ,31 个底事件的模糊数及上下限见表 3 所示。

2)顶事件发生概率的计算

根据上述 28 个最小割集,运用表 3 中的底事件发生概率的模糊数,采用式(7)、(8)求得 28 个最小割集发生概率的模糊数,见表 4。如:割集 {X1X2} 发生概率的模糊数为:(0.004 5,0.005,0.005 5)。

将 28 个最小割集视为独立事件,根据式(9)计算出顶事件发生概率  $P^T$ 。

$$P^T = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - \prod_{x_i \in k_j} P_i] \quad (9)$$

式中: $m$  为最小割集数; $k_j$  为最小割集; $p_i$  为底事件  $x_i$  的概率; $x_i$  为底事件; $x_i \in k_j$  为属于最小割集  $k_j$  的底事件。

将最小割集发生概率的模糊数代入式(9),从而获得双壁钢围堰施工风险顶事件发生概率的模糊数为:

$$P_T = (0.050 15, 0.052 78, 0.055 42)$$

数据表明,武汉鹦鹉洲长江大桥 2#水中墩基础施工风险发生概率为 5.015%~5.542%。

表 2 概率值与事件发生可能性对应关系

概率值	可能性	概率值	可能性
0.01	不可能	0.2	可能但不经常
0.05	可能性很小	0.4	可能且严重
0.1	可能性较小	0.7	可能且非常严重

表 3 故障树中各底事件的模糊概率

符号	底事件	模糊概率			符号	底事件	模糊概率		
		$a=0.95$	$m$	$b=1.05$			$a=0.95$	$m$	$b=1.05$
X1	胎架刚度不足	0.047 5	0.05	0.052 5	X16	平台贝雷梁坠落	0.048	0.05	0.052 5
X2	焊接区除污不彻底	0.095	0.1	0.105	X17	导向架变形	0.048	0.05	0.052 5
X3	焊缝渗漏	0.009 5	0.01	0.010 5	X18	钢护筒变形	0.095	0.1	0.105
X4	钢凳未抄平	0.047 5	0.05	0.052 5	X19	钢护筒插打不连续	0.095	0.1	0.105
X5	气囊破坏	0.047 5	0.05	0.052 5	X20	卡钻	0.19	0.2	0.21
X6	底隔舱倾斜	0.047 5	0.05	0.052 5	X21	塌孔,缩颈	0.095	0.1	0.105
X7	围堰局部搁浅	0.009 5	0.01	0.010 5	X22	导管挂碰钢护筒	0.095	0.1	0.105
X8	人员坠落	0.095	0.1	0.105	X23	断桩	0.048	0.05	0.052 5
X9	拉缆交叉缠绕	0.047 5	0.05	0.052 5	X24	冷却水管堵塞	0.048	0.05	0.052 5
X10	拉缆脱钩,绷断	0.047 5	0.05	0.052 5	X25	模板松动变形	0.095	0.1	0.105
X11	围堰着床时倾斜	0.19	0.2	0.21	X26	混凝土配合比不恰当	0.095	0.1	0.105
X12	围堰着床位置偏差	0.095	0.1	0.105	X27	分层浇筑厚度过大	0.048	0.05	0.052 5
X13	出现涌砂现象	0.095	0.1	0.105	X28	混凝土浇筑温度过高	0.19	0.2	0.21
X14	封底混凝土夹渣砂石	0.095	0.1	0.105	X29	环境温度过低	0.19	0.2	0.21
X15	平台安装偏差	0.047 5	0.05	0.052 5	X30	保湿工作不及时不充分	0.095	0.1	0.105
					X31	无安全培训	0.095	0.1	0.105

表 4 最小割集模糊数

最小割集	模糊概率			最小割集	模糊概率		
	$a$	$m$	$b$		$a$	$m$	$b$
X3	0.009 5	0.01	0.010 5	X29	0.19	0.2	0.21
X7	0.009 5	0.01	0.010 5	X30	0.095	0.1	0.105
X8	0.095	0.1	0.105	X31	0.095	0.1	0.105
X11	0.19	0.2	0.21	X1X2	0.004 51	0.005	0.005 1
X14	0.095	0.1	0.105	X1X3	0.000 5	0.000 05	0.000 6
X15	0.047 5	0.05	0.052 5	X4X5	0.002 256 25	0.002 5	0.002 756 25
X16	0.048	0.05	0.052 5	X4X6	0.002 256 25	0.002 5	0.002 756 25
X20	0.19	0.2	0.21	X9X10	0.002 256 25	0.002 5	0.002 756 25
X21	0.095	0.1	0.105	X11X12	0.018 05	0.02	0.022 05
X22	0.095	0.1	0.105	X11X13	0.018 05	0.02	0.022 05
X23	0.048	0.05	0.052 5	X17X18	0.004 56	0.005	0.005 512 5
X26	0.095	0.1	0.105	X17X19	0.004 56	0.005	0.005 512 5
X27	0.048	0.05	0.052 5	X15X24	0.002 28	0.002 5	0.002 756 25
X28	0.19	0.2	0.21	X25X30	0.009 025	0.01	0.011 025

2.5 底事件敏感性分析

双壁钢围堰底事件的敏感性分析由公式 10 获得。

$$C_i = (P_T - P_{T_i}) / P_T \quad (10)$$

式中,  $C_i$  为底事件敏感性指标,  $P_{T_i}$  为底事件  $i$  不发生时顶事件的发生概率, 由式(10)对表 3 中底事件进行敏感性分析, 例如对底事件焊缝渗漏(X3)进行敏感性分析。X3 不发生的模糊概率为(0.990 5, 0.990, 0.989 5), 将其与其他 27 个最小割集发生概

率的模糊数, 根据式(9)计算出  $P_{T_i}$  发生概率为(0.039 88, 0.041 52, 0.043 45), 同理可对其他底事件进行敏感性计算分析, 敏感性指标排在前 10 位的底事件为:

$$X3 > X23 > X13 > X8 > X11 > X16 > X18 > X5 > X1 > X21$$

最后, 计算得到上述 10 位底事件的敏感性指标见表 5。

表5 前十位敏感性指标值

敏感性指标	模糊概率			敏感性指标	模糊概率		
	a	m	b		a	m	b
C3	0.039 88	0.041 52	0.043 45	C16	0.028 81	0.030 22	0.032 11
C23	0.038 17	0.040 11	0.042 31	C18	0.026 98	0.028 99	0.030 03
C13	0.035 98	0.037 66	0.038 52	C5	0.025 15	0.027 11	0.029 85
C8	0.032 63	0.034 11	0.036 29	C1	0.021 01	0.023 13	0.025 89
C11	0.029 88	0.031 62	0.033 13	C21	0.019 78	0.020 13	0.021 98

结果表明焊缝渗漏、断桩、出现涌砂现象是双壁钢围堰2#水中墩施工风险影响因素最大的底事件,对水中墩安全施工会产生重大影响。

计算过程中,由于输入和采集的数据较多,为使计算结果更准确,文中借助通用软件 EXCLE 语言编辑计算函数进行运算和数据处理,计算效果良好。

### 3 防范措施

通过上述分析表明,焊缝渗漏、断桩、出现涌砂现象是2#水中墩施工中风险最大的施工工序,特提出如下防范措施<sup>[15-16]</sup>,以保证施工安全顺利进行。

#### 1) 杜绝焊缝渗漏

焊条、焊丝、焊剂等焊接材料应根据焊接工艺确定,并按规定程序报批确认后方可实施;胎架应具有足够刚度,以防止单元构件在组焊过程中变形,胎架数量应根据制作周期及施工工期由现场自行确定,胎架的精度应力求一致。胎架要求定期进行复核,防止在拼装过程由于重力影响产生变形;组装前必须清除待焊区域的铁锈、氧化铁皮、油污、水分等有害物,使其表面显露金属光泽;底隔舱在制造时必须控制其正方度,测量其四个方向的对角线误差,保证拼装时空间位置正确,底隔舱面板对接和侧板单元块对接时应保证所有焊缝全部焊透,不漏水。

#### 2) 避免断桩

各节导管内径大小一致,偏差不大于±2 mm。导管下放过程中应保持位置居中,轴线顺直,逐步沉放,防止卡挂钢筋笼和碰撞孔壁;配置足够备用应急设备和材料,确保浇筑水下混凝土时间不大于4 h,必要时在混凝土内掺入缓凝剂以确保工程质量;沉渣厚度大于20 cm,必须再次进行清孔;保证首批混凝土浇筑后导管理入混凝土中的深度不小于1 m,并能填充导管底部间隙。在后续混凝土浇筑过程中,导管理深应不小于2.0 m,且埋深不得大于6 m;混凝土浇筑开始后,应快速连续进行,不得中断。最后拔管时注意提拔及反插,保证桩芯混凝土密实度。

#### 3) 防范涌砂

避免围堰产生倾斜和位移,围堰外四周河床高差不宜过大。如发现此种情况后,应立即采取抛石防护及整平河床等措施,并应注意将吸泥机向河床较低处出泥弃土;吸泥时每2 h测一次井孔内泥面高度,并根据井孔中的泥面情况绘制等高线图及时分析,随时调整吸泥部位;做到边吸边补水,并准备好4台水泵,防止围堰内水面低于围堰外水面造成翻砂现象。

### 4 结论

1)建立了双壁钢围堰水中墩施工风险模糊故障树评价方法,获得了双壁钢围堰水中墩施工风险的底事件31个,最小独立割集28个,明确了施工风险因素最大的前10个底事件。

2)双壁钢围堰2#水中墩施工风险发生概率的模糊数为(0.050 15,0.052 78,0.055 42),表明2#水中墩施工风险比较大,焊缝渗漏、断桩、出现涌砂等是施工风险较大的关键工序,应采取相应的防范措施,以降低双壁钢围堰水中墩的施工风险。

#### 参考文献:

- [1] David G E. Risk balancing in structural problems [J]. Structure Safty, 2003, (19):67-77.
- [2] 阮欣. 桥梁工程风险评估体系及关键问题研究[D]:上海,同济大学,2006.
- [3] 娄峰,何勇,邓良强. 我国桥梁施工事故分布及发生规律研究[J]. 公路交通科技,2009,59(11):236-238. Lou F, He Y, Deng L Q. The regularity of bridge construction accident distribution and occurrence in china [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2009,59(11):236-238.
- [4] Ali A, Ali S N, Jason L. Modeling the risk of structural fire incidents using a self-organizing map [J]. Fire Safety Journal,2012,49:1-9.
- [5] Joze S, Janvit G. New approach to calculate the probability of risk [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2011,24:288-291.

- [6] Zhang X Q, Wang J G, Liu M H. Risk assessment study on bridge foundation in deep overlying stratum [J]. *Engineering Sciences*, 2012(3):38-43.
- [7] 杨伟军,王鹏. 基于云标尺和最不利状态的桥梁施工风险评价方法研究[J]. *中外公路*, 2013(33):89-93.  
Yang W J, Wang P. Research on bridge construction risk evaluation method based on cloud scale and the most unfavorable state [J]. *Journal of China & Foreign*, 2013(33):89-93.
- [8] 刘亚莲,周翠英. 基于模糊事故树理论的堤防失事风险分析[J]. *水电能源科学*, 2010,28(6):86-88.  
Liu Y L, Zhou C Y. Risk analysis of embankment failure based on fuzzy fault tree [J]. *Water Resources and Power*, 2010,28(6):86-88.
- [9] 袁昌明,张晓冬,章保东. 安全系统工程[M]. 北京:中国计量出版社, 2006.
- [10] Kaplan S. The words of risk analysis [J]. *Risk analysis*, 2008(17):33-34.
- [11] Williamson E B, Winget D G. Risk management and design of critical bridge terrorist attacks [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2005,(10):96-106.
- [12] 李新站,黄坤,陈建霞,等. 油库火灾爆炸故障树分析[J]. *天然气与石油*, 2011,3(29):21-23.  
Li X Z, Huang K, Chen J X, et al. Fault tree analysis in oil depot fire and explosion [J]. *Natural Gas and Oil*, 2011, 3(29):21-23.
- [13] Metin C. A risk-based modelling approach to enhance shipping accident investigation [J]. *Safety Science*, 2010,48:18-27.
- [14] Sadoullah E, Seyed M M, Hamed S. Risk identification and assessment for build-operate-transfer projects: A fuzzy multi attribute decision making model [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010,37:575-586.
- [15] 谭立心,王中文,钟建锋,等. 强涌潮水域埋置式承台双壁钢围堰的下放精度控制[J]. *桥梁建设*, 2012,42(4):93-98.  
Tan L X, Wang Z W, Zhong J F, et al. Accuracy control of lowering of double-wall steel cofferdams for embedded piles caps in strong tidal bore water area [J]. *Bridge Construction*, 2012,42(4):93-98.
- [16] 王贵春,皇甫昱. 桥梁深水基础双壁钢围堰施工技术分析[J]. *铁道建设*, 2007(8):22-24.  
Wang G C, Huang F Y. Analysis of double-wall steel cofferdam for the bridge deep water foundation construction technical [J]. *Railway Engineering*, 2007(8):22-24.

(编辑 胡玲)