

# 基于改进 AHP 的冲击钻孔桩施工风险评价

于坤朋<sup>1</sup>, 吴同情<sup>2</sup>, 范昕然<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆科技学院, 重庆 401331)

**摘要:** 根据部分桩基完整性检测结果, 采用因果分析法辨识冲击成孔灌注桩施工中存在的风险, 并用改进的 AHP 得出各因素权重的大小, 显示主要因素和次要因素, 为冲击钻孔灌注桩施工重点控制提供依据。从实际工程调查以及搜集资料、因果分析建立层次结构模型、最优传递矩阵的构造、评价分析、控制风险等方面对实际工程案例进行分析, 得到科学的、有预见性的结论, 为冲击钻孔桩施工提供一种逻辑性强、适用性强的分析方法。

**关键词:** 层次分析法; 因果分析; 最优传递矩阵; 冲击钻孔灌注桩

**中图分类号:** TU753.3      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1007-7839 (2017) 02-0052-06

## Risk Assessment of impact drilling pile construction based on improved AHP

YU Kunpeng<sup>1</sup>, WU Tongqing<sup>2</sup>, FAN Xinran<sup>1</sup>

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** According to the test results of pile integrity, causal analysis method was adopted to identify the risks in impact drilling pile construction. And the improved AHP is used to get the weight of each factor and show primary and secondary factors to provide guidance for key risk controls. From the practical engineering investigation and data collection, causal analysis, establish hierarchical structure model, the optimal transfer matrix construction and evaluation analysis and risk control, a practical engineering case is analyzed, scientific, predictable conclusions are gained. A strong logic, strong applicability analysis method for impact bored pile construction is provided.

**Key words:** analytic hierarchy process (AHP); causal analysis method; optimal transfer matrix; impact drilling pile

## 0 引言

冲击钻成孔施工法是我国历史悠久的一种钻孔施工法, 具有适用性强、不需大型起重船配合作业, 对平台的要求较低、成本低廉等特点<sup>[1]</sup>, 广泛应用于水利水电系统、交通港口、公路、铁路系统。根据不同地质和桩径情况, 配制不同的泥浆, 采用冲击式钻机和卷扬机利用其冲击动能冲挤土层成破碎岩层形成桩成孔, 采取水下导管法浇筑

混凝土成桩。钻孔、混凝土灌注均是水下作业, 具有隐蔽性和可视性差的特点, 导致施工质量、安全风险因素很多<sup>[2]</sup>。

冲击钻孔桩施工风险即在冲击钻孔灌注桩施工过程中出现的, 对相关利益团体的某种既定目标造成影响的不确定事态。系统科学地分析施工过程中的风险是最核心的问题, 对风险因素进行定性和定量的评价, 找出安全隐患, 杜绝事故

收稿日期: 2016-11-21

作者简介: 于坤朋 (1990-), 男, 硕士, 研究方向为水下结构。

的发生,是消除施工隐患的最好途径。影响冲击钻孔桩施工的风险因素很多,各因素之间关系复杂、模糊,很难直接的描述和计算。

很多学者对桩基施工风险进行大量研究,朱琳<sup>[3]</sup>基于可靠度原理,采用蒙特卡洛有限元法对施工期的深水桩基工程进行了风险分析;蒋根谋<sup>[2]</sup>采用事故树分析法来辨识风险因素,并用 AHP 的方法来评价冲击成孔灌注桩各风险事故的重要性进行了研究;王可意<sup>[4]</sup>利用层次分析法建立桩基基础施工安全评价指标体系,并结合数据包络分析评价方法进行评价;江浩<sup>[5]</sup>建立符合实际情况的钻孔灌注桩施工风险评价指标,并采用层次分析法和灰色评价法对钻孔灌注桩施工风险进行评价。在已有的研究基础上,本文通过实际工程调查以及资料搜集,对资料统计分析,利用因果分析法总结出施工过程中的风险因素,进而根据资料文献以及和施工现场技术人员交流,有选择的建立层次递阶结构模型,将主观定性判断运用定量化的科学处理方法,有效减少人为主观性的影响。

## 1 改进层次分析法

### 1.1 鱼刺—递阶层次模型

日本的石川馨先生通过有效数据的搜集和演示,以促进质量工具用于优化质量改进而著称,进而研究出了鱼刺图,又称为石川图、因果分析图、特性要因图、树枝图等,是表示质量问题与产生原因因果关系的图。由于导致风险事故发生的因素多种多样,而这些因素往往是错综复杂的交织在一起,容易导致层次结构模糊化、混乱化。采用鱼刺图分析时,质量问题沿主干线人—机—料—法—环等中的一项或几项引起,首先分析问题的大原因,确定大原因后,再进一步分析引起大原因(大刺)的中原因(中刺),进而小原因(小刺)<sup>[6]</sup>。这样由表及里、由浅入深地分析问题的原因,一方面在一定程度上减少了人的主观性带来的影响,另一方面尽可能的把一些容易忽略的因素考虑进来,形成逻辑缜密的框架。

鱼刺图具有三个显著的优点<sup>[7]</sup>:

(1)对所观察的效应或考察的现象有影响的原因的直观表示;

(2)将这些可能的原因的内在关系被清晰地显示出来;

(3)建立的内在关系一般是定性的和假定的。实际分析时,通过资料的搜集和调研,进行统计分析,由结果去分析问题的原因,形成因果分析过程,按相互关联性画出鱼刺图,形成层次分明、条理清楚的层次结构模型。由鱼刺图分析过程到层次递阶结构的建立,一定程度上弥补了传统层次结构的不足,如:风险因素不全、层次不清楚、各指标之间的关系不明等。

### 1.2 构造各层次的判断矩阵

递阶层次建立后,上下元素间形成隶属关系。各准则层在目标衡量中的比重不一定相同,在决策者心里,每个元素都占有一定比例。层次分析法的核心部分是各个因素两两比较,决策者基于上层目标对准则两两比较,决定下层元素对于上层元素的重要度,即权重<sup>[8]</sup>。传统层次分析法的判断矩阵用点值表示,再加上 9 标度法差异性不明显以及信息的不完善和主观判断,往往会出现不确定的判断,进而导致判断矩阵的不一致性,使得判断的结果与实际偏差很大,而采用 0、1、2 三个标度,能使决策者更容易作出比较和判断,避免不易确定百度的臆断性。通过最优传递矩阵的引入将其转化成一致性矩阵,不需要进行一致性检验使得满足一致性要求直接求得各个目标的权重进行多目标决策分析<sup>[9]</sup>。见公式(1)。

$$W_i = \frac{\sqrt[m]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[m]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}} \quad (1)$$

#### 1.2.1 判断矩阵的建立

李绍勤<sup>[10]</sup>揭示了在层次分析法中引入最优矩阵而产生的误导原因,采用与“贴适度”结合,介绍了一种新的检验方法。本文借鉴其研究成果,应用到实例当中得到的结果,由于三标度法建立的矩阵并不能满足互反矩阵的要转换成反对称矩阵,所以由三标度法得到比较矩阵  $A_{ij}$  由

$$\begin{cases} 2-i \text{ 因素比 } j \text{ 因素重要} \\ 1-i \text{ 因素比 } j \text{ 因素同等重要} \\ 0-j \text{ 因素比 } i \text{ 因素重要} \end{cases}$$

建立的比较矩阵  $A_{ij}$ :

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

根据  $r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ , 取  $r_{max} = \max \{r_i\}$ , 计算出基点

标度  $b_m$ 。

$$\text{由公式} \begin{cases} \frac{r_{\min}}{r_j - r_i + r_{\min}}, & r_i < r_j \\ \frac{r_i - r_j + r_{\min}}{r_{\min}}, & r_i \geq r_j \end{cases}$$

计算得到判断矩阵  $U_{ij}$  的元素  $u_{ij}$ 。

### 1.2.2 最优传递矩阵的建立

韩雪松<sup>[11]</sup>介绍了最优矩阵的含义: 若存在传递

矩阵  $C$  且  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} - b_{ij})^2$  最小, 则矩阵  $C$  为  $B$  的最优矩阵。

定理: 若  $B$  是反对称矩阵, 则  $B$  的最优矩阵

$C$  应满足:  $c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{ik} - b_{jk})$ 。

### 1.3 各指标的权重

采用方根法确定各指标的权重, 求得各指标的权重向量:

$$\omega = (\omega_1, \omega_2 \cdots \omega_m)$$

### 1.4 指标层对目标层的组合权重

根据  $c_i = \sum_{j=1}^n \omega_j z_{ij}$  计算各层元素对上一层的权重, 在计算权重的过程均是归一化后的权重, 所以计算得出的所有因素的合成权重之和为 1, 从而可以得出合成权重的总排序。

## 2 实例分析

针对重庆某地区冲击钻孔桩施工现场进行资料搜集以及跟踪调查, 具体工程概况如表 1。

表 1 实际工程跟踪调查

工程名称	钻机型号	桩径 (m)			根数	资料搜集
重庆港某作业区	CJF-2000	1.8	2.0	2.2	168	桩基专项施工方案、施工组织设计、地质勘察报告、安全专项方案
某地区挡墙加固一标段	CK3000CK	2.8	3.0	3.2	266	桩基施工专项方案、地质勘察报告、安全专项方案
某地区挡墙加固二标段	CK3000CK	3.0	3.2			安全专项方案、桩基专项施工方案、地质勘察报告

### 2.1 因果分析

冲击钻孔桩施工工序: 平台搭设→钢护筒埋设→冲击成孔→清孔→钢筋笼制作安放→导管法灌注混凝土。由于成孔设备不同, 冲击钻孔桩有如下独特的施工注意事项: ①保证冲击钻头在孔内以最大加速度, 以增大冲击力; ②根据不同地层情况, 选择合理钻进参数; ③在钢丝绳上做标

记控制冲程; ④停钻后再次开钻时, 应由低冲程逐渐加大; ⑤钻头锥顶和钢丝绳间设置自动转向装置。

根据冲击钻孔桩施工注意事项、搜集到的工程资料以及文献书籍, 在施工过程中常遇到的问题有: 钻孔不圆、冲击钻头被卡、塌孔、导管漏水、断桩、二次封孔等<sup>[2,12-13]</sup>。利用因果关系(鱼刺图)按施工工序有层次的组成鱼刺图, 如图 1。

上述因果分析图以冲击钻孔桩施工工艺为阶段, 每个施工阶段从人、机、环境、管理等方面分析存在或潜在的风险事故, 形成有层次、有条理的分析结构, 从而避免一些隐蔽性大以及容易被决策者忽略的因素漏掉。从因果分析图可知, 人员方面的一些培训、安全意识薄弱等是容易被忽略的因素, 机械方面使用前的检查易被忽略等。

### 2.2 建立递阶层次模型

由因果分析结果以及施工现场的反馈, 选择主要的风险因素, 构建层次结构模型, 模型分为三个层次, 如图 2。

(1) 目标层。风险分析的目标是对冲击钻孔桩施工过程风险评估, 为决策者提供依据, 控制施工过程风险事故的发生。

(2) 准则层。根据上述对冲击钻孔桩施工因素的辨识, 列出了四类施工中常见的风险, 提取了 20 个因素作为准则层。

(3) 事故层。由 20 个风险因素导致的事故类型有机械伤害、起重伤害、坍塌、触电、其他伤害。

### 2.3 三标度比较矩阵以及判断矩阵的建立

从第二层开始, 利用三标度依次建立比较矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 6 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}$$

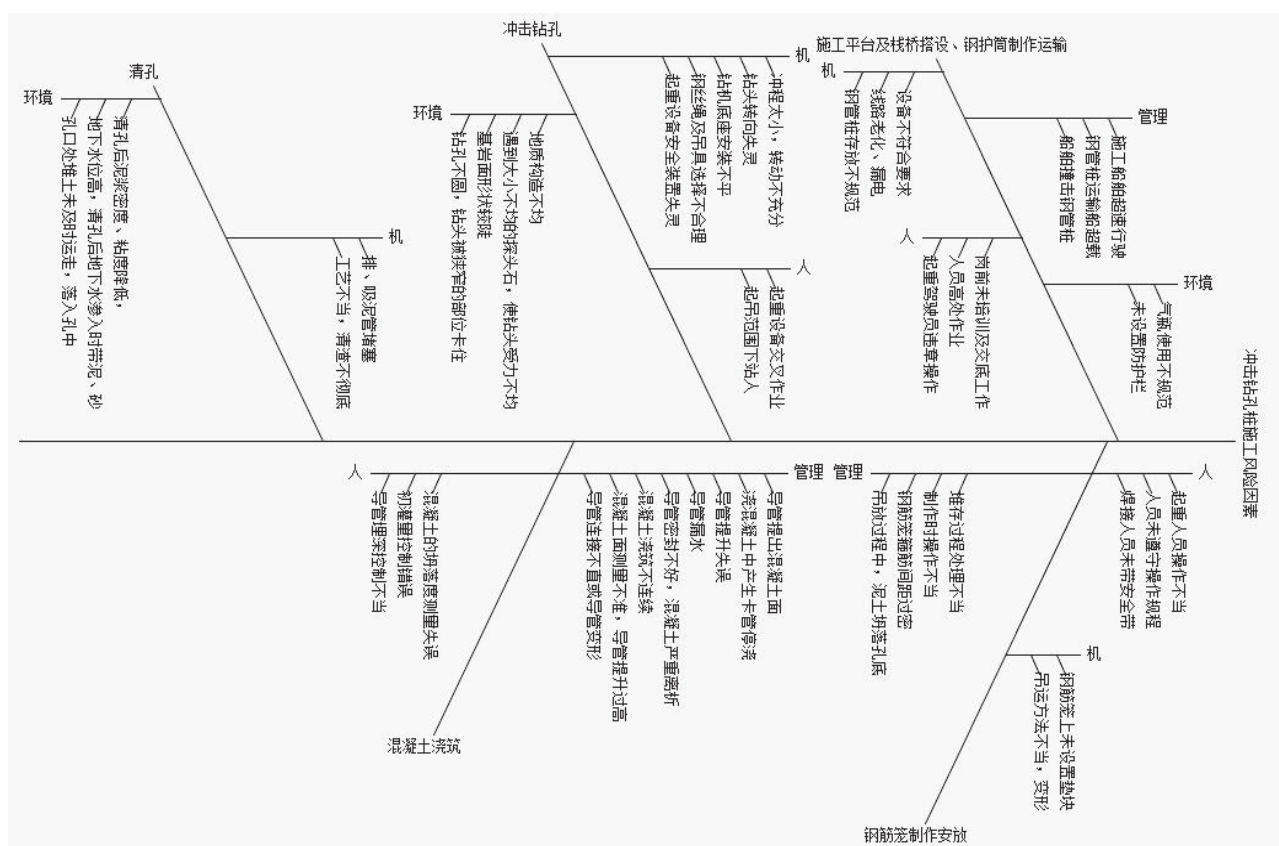


图 1 鱼刺图

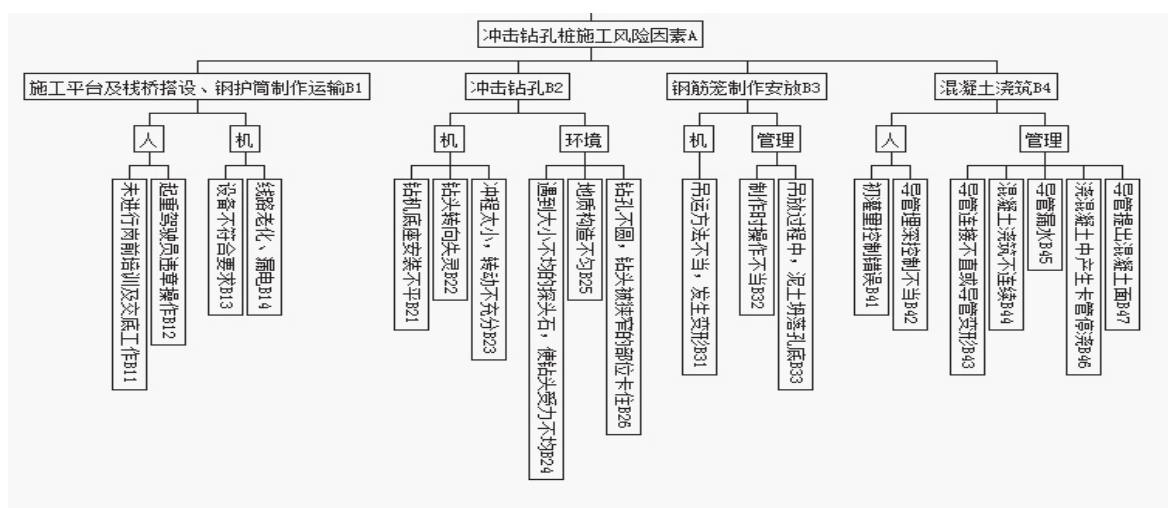


图 2 层次结构模型

此时有:  $r_{max}=6, r_{min}=1, k_m=3.5$   
计算的间接判断矩阵为:

$$U_A = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 5 & 4 \\ 1/6 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1/4 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

同理可得第三层 B1, B2, B3, B4 的比较矩阵及判断矩阵:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, U_{B_1} = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/4 & 1/6 \\ 5 & 1 & 2 & 1/2 \\ 4 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 6 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$



$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}, U_{B_2} = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 9 & 5 & 5 & 9 \\ 1/7 & 1 & 3 & 1/3 & 1/3 & 3 \\ 1/9 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1/5 & 1 \\ 1/5 & 3 & 5 & 1 & 1 & 5 \\ 1/5 & 3 & 5 & 1 & 1 & 5 \\ 1/9 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, U_{B_3} = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/3 \\ 5 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, U_{B_4} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & 11 & 7 & 10 & 12 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 7 & 3 & 6 & 8 \\ 1/3 & 3 & 1 & 9 & 5 & 8 & 10 \\ 1/11 & 1/7 & 1/9 & 1 & 1/5 & 1/2 & 2 \\ 1/7 & 1/3 & 1/5 & 5 & 1 & 4 & 6 \\ 1/10 & 1/6 & 1/8 & 2 & 1/4 & 1 & 3 \\ 1/12 & 1/8 & 1/10 & 1/2 & 1/6 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

夏正洪<sup>[14]</sup>在改进的层次分析法中提出,如果判断矩阵的行列式的值等于零,说明该判断矩阵具有完全一致性。计算其判断矩阵的行列式均为零,满足一致性条件。

### 2.3 层次单排序及权重总排序

由几何平均法计算出第二、第三单层因素权重,在计算下层元素对其上一层元素中某元素的权重,最后得到各层元素的权重,特别是底层元素对最高层目标的权重,即合成权重。合成权重的计算由最高层次到最低层次逐层进行<sup>[15]</sup>,计算结果见表2。

从表2结果可看出,在冲击钻孔桩施工过程中施工平台及栈桥搭设和钢护筒制作运输两个阶段中共同存在可控因素,也是容易管理者以及施工人员忽略的线路老化、漏电权重高达0.286,排在第二、第三的是起重驾驶员违章操作和设备不符合要求,从整体来看,导致人员伤亡的风险因素也是最容易发生的。分析表中的数据排序,可以看出各可控因素的重要程度,也就是它们在冲击钻孔桩施工过程中“贡献”的大小,为正确识别和评估冲击钻孔桩施工提供了依据。必须要说明的是,此计算结果是由上述搜集资料所得,部分工地出现和发现的问题,也许在数据中的权重排序并不突出。由于各个现场具体情况以及决策管理者都有差别,上述排序也会相应的发生变化,而这种排序带来的改变,是今后冲击钻孔桩施工风险评价和关注的焦点。

## 3 结语

(1)以3个工程搜集到的资料,统计得到5类20个可控因素,建立了可控因素评价指标体系,从风险管理的角度提出冲击钻孔桩施工过程中应重点控制的环节。

(2)首先采用因果分析,具有一定的预见性,避免容易遗忘和忽略的风险因素漏掉,再建立层

表2 各指标权重及组合权重

目标层	冲击钻孔桩施工风险因素 A									
准则层	B1					B2				
	0.600					0.078				
指标层	B11	B12	B13	B14	B21	B22	B23	B24	B25	B26
	0.059	0.290	0.175	0.476	0.520	0.076	0.036	0.166	0.166	0.036
排序	0.035	0.174	0.105	0.286	0.041	0.006	0.003	0.013	0.013	0.003
	8	2	3	1	7	14	17	12	12	17
准则层	B3					B4				
	0.121					0.201				
指标层	B31	B32	B33	B41	B42	B43	B44	B45	B46	B47
	0.105	0.258	0.637	0.435	0.146	0.258	0.025	0.082	0.035	0.018
排序	0.013	0.031	0.077	0.087	0.030	0.052	0.005	0.016	0.007	0.004
	12	9	5	4	10	6	15	11	13	16

次递阶模型,建立的层次结构有层次性、有针对性,形成逻辑上较为完整的分析方法。

(3)利用改进 AHP 计算了各层的相对权重及组合权重,引用最优矩阵使一致性检验化繁为简,得到各因素影响大小的排序结果,为决策者提供了量化的依据。

同时,本文的研究也存在着不足之处,采用因果分析辨识风险因素时,过程较为繁琐,客观性比较大,可能产生误差较大。

### 参考文献:

- [1] 秦体达,张琦.冲击钻机海上钻孔桩施工工艺[J].中国港湾建设,2010,166(2):70-73.
- [2] 蒋根谋,孙康,等.基于AHP法的冲击钻孔桩施工风险评估[J].施工技术,2012,368(41):55-57+61.
- [3] 朱琳,黄宏伟,等.深水大直径嵌岩钢管桩施工工期风险分析[J].水运工程,2012,463(2):143-147.
- [4] 王可意,杨春风.AHP-DEA在桥梁施工风险评价中的应用研究[J].河北工业大学学报,2014,43(2):102-106.
- [5] 江浩,陶卫中.基于多层次灰色评价法的钻孔灌注桩施工风险评价[J].科技和产业,2014,14(12):142-146.
- [6] 王嘉兰.“鱼刺图”改进的探讨[J].质量与质量工程,2010,2:25-27.
- [7] 介彬魁.基于鱼刺图分析方法的建设项目投资决策研究[J].现代经济,2009,8(8):4-7.
- [8] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.
- [9] 胡志根.施工导流风险分析[M].北京:科学出版社,2010.
- [10] 李绍勤,王大伟.基于最优传递矩阵层次分析法的改进及应用[J].云南民族大学学报(自然科学版),2007,16(3):193-196.
- [11] 韩雪松,樊国强.三标度AHP法在矿山地质环境评估中的应用\_以山西省大同市某煤矿为例[J].地下水,2013,35(3):148-150+153.
- [12] 高玉良.冲击钻进工程桩事故原因分析及预防处理方法[J].西部探矿工程,2007,1:116-117.
- [13] 陈日胜,周翰斌.海上超长超深嵌岩钻孔灌注桩施工技术[J].施工技术,2012,41(360):52-56.
- [14] 夏正洪,王俊峰.一种改进的层次分析法及其在效能评估中的应用[J].四川大学学报(自然科学版),2010,476(1):71-76.
- [15] 刘刚,金业权.层次分析法在井控风险可控诱因分析中的应用[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(2):137-141.

(责任编辑:王宏伟)