

引水工程超深圆形基坑施工风险分析与质量控制

胡开富¹, 龚振宇², 徐前卫³, 孙梓粟³

(1. 云南省滇中引水工程建设管理局昆明分局, 云南 昆明 655600;

2. 中铁五局电务城通公司, 湖南 长沙 410205;

3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 结合超深基坑及圆形基坑施工特点, 以滇中引水龙泉倒虹吸盾构接收井工程为例, 采用半定量的 *LEC* 法对该基坑开展风险评估。首先结合圆形基坑施工难点, 对地连墙施工至基坑开挖的全过程中出现的风险源进行识别, 然后基于 *LEC* 法对地连墙施工、钢筋施工、起重吊装、模板工程、基坑开挖施工五个方面的风险情况进行指标化分析, 从而判定工程各施工阶段的风险源分级, 并制定相应的质量控制措施专项方案。通过该方法进行风险分析, 可以有效确保工程的施工安全, 对同类超深圆形基坑也具有一定的指导借鉴意义。

关键词: 超深基坑; 圆形基坑; 风险评估; 质量控制

中图分类号: TV671

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)05—0143—06

Construction Risk Analysis and Quality Control of Super Deep Circular Foundation Pit for Water Diversion Project

HU Kaifu¹, GONG Zhenyu², XU Qianwei³, SUN Zili³

(1. Kunming Branch of Central Yunnan Provincial Water Diversion Project Construction

Administration Branch, Kunming, Yunnan 655600, China;

2. The Electricity Engineering Co., Ltd. Under CREC No. 5 Group, Changsha, Hunan 410205, China;

3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the construction characteristics of ultra-deep foundation pits and circular foundation pits, Longquan Inverted Siphon Shield Receiving Well in Central Yunnan was taken as an example and the semi-quantitative *LEC* method was adopted to carry out risk assessment of the foundation pit. Firstly, combined with the difficulties in the construction of circular foundation pits, we identify every risk sources appearing in the whole process from the construction of the ground connection wall to the excavation of the foundation pit. Then based on the *LEC* method, the risk analysis of the five aspects of foundation pit excavation which contain the construction of the ground connection wall, reinforcement construction, lifting and lifting, formwork engineering, is indexed to determine the risk source grading at each stage of the project, and formulate a special plan for quality control measures. Through this method for risk analysis, it can effectively ensure the construction safety of the project, and it also has certain guiding significance for similar ultra-deep circular foundation pits.

Keywords: ultra-deep foundation pit; circular foundation pit; risk assessment; quality control

随着深基坑工程在国内的发展应用,越来越多的风险问题随之产生。由于多方因素造成的施工事

故层出不穷,对风险的把控失准,就意味着工程建设成本、工期、人员安全等方面难以得到保证,甚至会

造成不良的社会影响。因此,对深基坑工程施工中风险要素分析和过程监管安排变得尤为关键。通过风险分析理论减小工程事故发生率并降低不必要的损失,是目前工程建设中行之有效的一个方法^[1-4]。

针对工程风险评估的问题,目前已有大量的研究。王建波等^[5]、陈蓉芳等^[6]基于 DEA - AHP 和 BP 神经网络,建立深基坑施工风险评估模型,完成地铁站深基坑施工风险预测,确定了风险等级。张锦等^[7]、吴波等^[8]、陈云超等^[9]采用模糊综合评价法对桥梁、隧道、基坑及公路边坡失稳风险进行评估,并对高风险的因素采取措施进行控制。徐青等^[10]运用 DEMA - TEL 方法构建了地铁深基坑施工事故致因网络模型,归纳出地铁深基坑事故的基础因素层、中间致因层和近邻事故层,提取了导致地铁深基坑事故的关键致因因素,并分析了地铁深基坑施工致因因素之间的相互关系与重要性。林树枝等^[11]以正在施工的高殿站点为例,通过 WBS 逐级分解得到的主要工序的失效状态,建立了风险识别指标体系,再基于层次分析法和模糊评价原理建立三级模糊综合评判计算模型,并对该车站基坑施工风险进行评估。吴昊城等^[12]通过路堑边坡定量风险评估技术框架,以实际工程为例对高边坡开挖及加固两个阶段开展定量风险评估,结合风险容许标准进行价值判断和风险决策,充分论证了该边坡加固治理及风险评估技术方案的必要性和可行性。陈绍清等^[13]建立了深基坑坍塌事故导致人员伤亡的事故树模型,再通过事故树建立层次结构模型,结合层次分析法对深基坑坍塌事故的致灾因素进行了定性识别和定量分析。郭亮等^[14]利用 LLE 流形方法提取众多施工振动风险评估样本影响因素组成的高维数据向量的非线性成分,然后将该非线性成分作为 ANFIS 评估方法的输入对施工振动风险样本进行评估分类,经实例验证该方法可以有效提高风险评估的准确性,降低错分率。杨瑞娟等^[15]采用 LEC 法,以明挖法钻孔灌注桩维护的地铁车站施工为研究对象,识别施工过程中的安全风险源,并对风险等级做出评价。

虽然目前众多学者对此开展了大量的研究工作,但是对超深基坑及圆形基坑研究还很少,其特殊的施工工艺对应的施工风险仍需深入研究。本文以滇中引水龙泉倒虹吸盾构接收井接收为例,基于 LEC 法对地连墙施工、钢筋施工、起重吊装、模板工程、基坑开挖施工五个方面进行风险评估,最后在此

基础上提出对应的施工安全控制措施,以期为类似工程提供一定的借鉴和指导作用。

1 工程概况

滇中引水工程龙泉倒虹吸接收井位于昆明市盘龙区昆曲高速与沔源路交叉口西侧绿化带内。接收井工程采用 $R = 10\text{ m}$ 圆形基坑结构,基坑周边环境平面图如图 1 所示。

基坑深 77.3 m ,属于超深基坑类型。围护结构采用 1.5 m 厚地下连续墙,成槽深度达 96.6 m ,设计墙深为 94.0 m ,空槽深度 2.6 m ,墙底嵌入基岩,共计 14 幅,先后分两期施工。地墙接头型式为铰接头,墙顶设锁口圈梁。接收井内衬墙厚度 1.0 m ,其立面如图 2 所示。



图 1 接收井基坑平面示意图

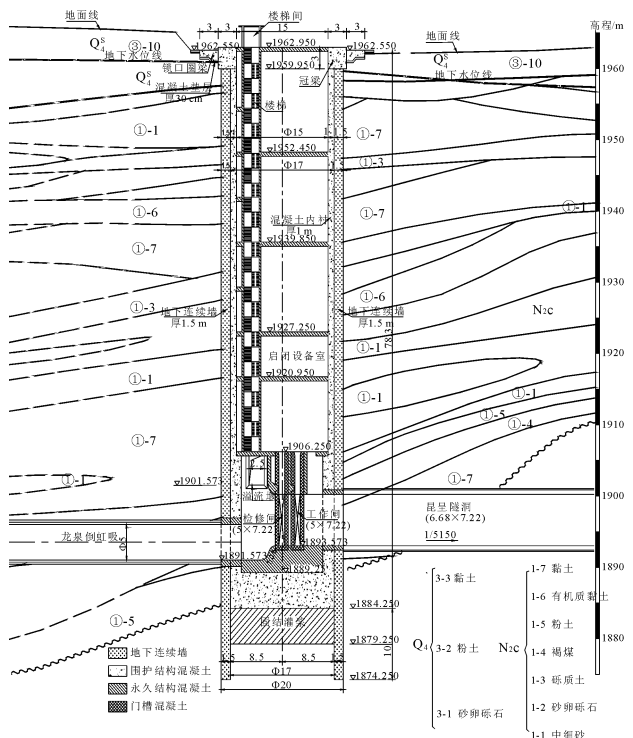


图 2 接收井立面图(显示内外墙)

2 工程重难点

龙泉倒虹吸盾构接收井位于第三系土层中,分析基坑所在的地层环境及尺寸特征,该基坑具有如下典型特点:

(1) 开挖深度大,基坑开挖设计深度达到 77.3 m,内直径为 15.0 m,地连墙设计深度达 96.6 m,属于极深的基坑工程,国内外无可借鉴的类似工程经验。

(2) 地层性状复杂,土体种类多样,土层界面繁多,且存在软弱薄夹层,施工过程风险高。

(3) 施工难度大,伴随着基坑开挖深度的增加,与之对应的施工步骤增多,基坑稳定性变差,导致基坑施工过程中岩土体位移、力学演变过程复杂,施工难度大。

(4) 该项目为圆形基坑,其受力以环向受压为主,若结构发生破坏将发生灾难性后果,对施工技术 & 监测水平等要求高。

3 风险评估方法及流程

3.1 评估方法选择

对于现有的基坑工程而言,风险评估得到越来越多的重视,在实践中已有多种方法形式通过检验,但客观来说,每一种方法都有其一定的适用范围和局限性。其中 *LEC* 风险评价方法应用较为广泛,其计算简便快捷,分类细致,结果可靠,适合在深基坑工程施工过程中使用。

因此,本文根据滇中引水龙泉倒虹吸接收井的实际情况、评价目标、已有的评价基础资料等,选择专家打分法中的 *LEC* 风险评价法为主要的风险评价方法,可望较好地对该基坑风险进行评估。

3.2 *LEC* 评价法

LEC 评价法具体方法如式(1)所示:

$$D = LEC \quad (1)$$

其中:*L* 值为发生事故的可能性,表现为事故产生的概率大小;*E* 值为暴露于危险环境的频繁程度,表现为危险作业环境的出现周期及相应的人员作业次数;*C* 值为事故产生的后果,表现为人身或财产损害的程度。

根据相关实例对以上三种变量 *L*、*E*、*C* 进行合理计算,给予相应的分数值及相应说明,如表 1—表 3 所示。

D 值为风险分值,直观表现为评价对象的危险程度。结合 *L*、*E*、*C* 评估结果,辨别有害因素的影响

深度,确定风险分值大小,即工程的危险程度,从而定义风险等级,如表 4 所示。

表 1 发生事故的可能性 (*L*)

分数值	发生事故的可能性
10.0	完全可以预料
6.0	相当可能
3.0	可能,但不经常
1.0	可能性小,完全意外
0.5	很不可能,可以设想
0.2	极不可能
0.1	实际不可能

表 2 暴露于危险环境中的频繁程度 (*E*)

分数值	频繁程度
10.0	连续暴露
6.0	每天工作时间内暴露
3.0	每周一次,或偶然暴露
1.0	每月一次暴露
0.5	每年几次暴露
0.2	非常罕见的暴露

表 3 发生事故产生的后果 (*C*)

分数值	后果
100	10 人以上死亡
40	3 至 9 人死亡
15	1 至 2 人死亡
7	严重
3	重大,伤残
1	引人注意

表 4 危险等级划分 (*D*)

<i>D</i> 值	危险程度	风险等级
>320	极其危险,不能继续作业	一级
160 ~ 320	高度危险,需立即整改	二级
70 ~ 160	显著危险,需要整改	三级
20 ~ 70	一般危险,需要注意	四级
<20	稍有危险,可以接受	五级

3.3 整体评估流程

对于本工程,风险评估流程如图 3 所示。

4 风险源识别与评价

4.1 地连墙施工过程风险源识别

(1) 导墙施工。导墙是在地下墙挖槽之前构筑的临时施工设施,它对地下墙施工具有多方面的重要作用,导墙主要用于确定地下墙单元槽段的位置、

防止泥浆流失、容纳和储存泥浆沟槽、作为钢筋笼入槽的支撑物等。圆形基坑超深地下连续墙施工期间,导墙需承受钢筋笼、浇注混凝土用的导管、成槽机、铣槽机、履带吊等静、动荷载的作用。

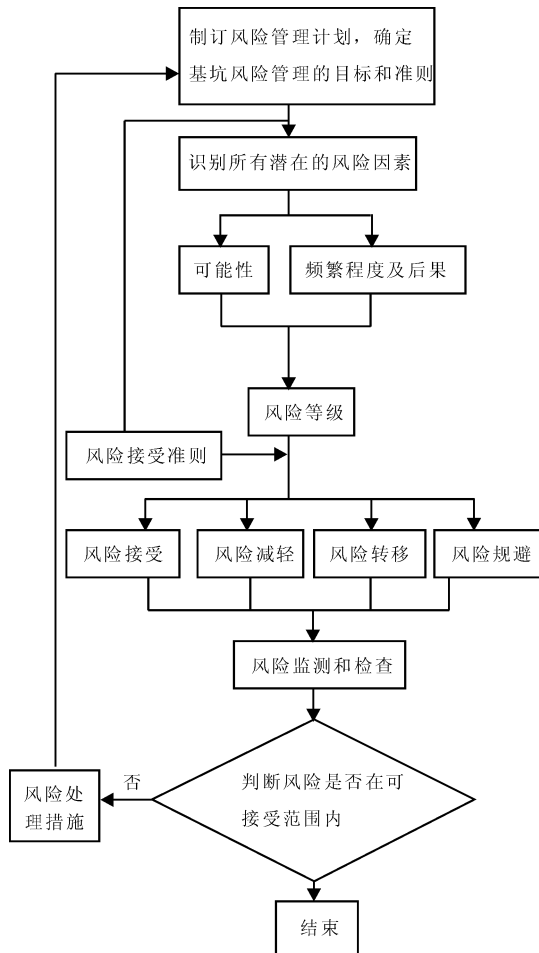


图3 风险评估流程图

导墙施工的风险因素主要包括:①导墙沟宽度超挖或土壁坍塌;②导墙沟内废弃管道未封堵密实;③导墙的内净宽度尺寸与内壁面的垂直精度不足;④导墙浇筑混凝土强度、拆模时间不满足设计要求;⑤拆模后导墙内进行内支撑导致产生向内位移;⑥周边施工荷载导致导墙偏斜;⑦导墙与槽段中心线不平行;⑧导墙开裂或下沉。

(2) 成槽开挖。圆形基坑超深地下连续墙采用液压抓斗挖槽过程中,抓斗入槽、出槽应慢速、稳当。开挖到岩面后,撤出液压抓斗并安装对位双轮铣槽机,施工时液压铣槽机垂直槽段,将液压铣槽机切割轮对准孔位徐徐入槽切削。

成槽开挖的风险因素主要包括:①成槽垂直度精度不足;②槽壁加固体侵入槽段范围内,开挖困难;③抓斗挖槽吃土阻力不均衡,导致槽孔弯曲;④

纠偏板处在底层中的位置,如遇铣削切头在相应较软的土层,而纠偏板在硬地层时,机头被硬地层卡住;⑤成槽进尺缓慢,铣槽机铣齿磨损掉刀。⑥铣削地段的基岩中存在溶洞、溶槽、断层、裂隙等渗漏通道,导致成槽漏浆。

(3) 泥浆制备及处理。圆形基坑超深地下连续墙成槽施工全过程中泥浆始终充满槽段,将泥浆液面控制在导墙顶面以下 50 cm,并高出地下水位 1 m 作为保证槽壁稳定的手段。

泥浆制备及处理的风险因素主要包括:①泥浆配比不适应工程需要导致护壁失效;②新制泥浆静置时间过短,膨润土颗粒未充分溶解,导致测量泥浆参数指标失准;③铣削钻孔时,置于铣削头中的泥浆泵抽吸孔底泥浆并经输浆管路送至地面的泥浆净化系统未进行除砂处理,导致护壁效果变差;④循环泥浆、劣质泥浆处理不当,混用排入槽段导致护壁效果变差;⑤槽内泥浆液面控制不稳定,水土压力不平衡导致塌孔;⑥由于槽内塌孔导致泥浆流失,液面迅速下降,未及时调整参数重新建立泥膜护壁。

(4) 刷壁及清孔换浆。为保证在连接缝位置,后期浇筑的混凝土和前期浇筑的混凝土较好的结合,避免漏水,在后续槽段成槽施工时需对前一槽段混凝土表面进行刷壁处理,清除附着在混凝土表面的土体和槽段内护壁泥浆形成的泥皮,以保证相邻槽段混凝土的有效接触,增加地下连续墙墙体的整体性。刷完接头后,采用双轮铣泵吸反循环方法将孔底沉渣排出。同时,对槽内泥浆进行置换,降低泥浆比重使其以利于混凝土的灌注。

刷壁及清孔换浆的风险因素主要包括:①刷锤在槽体中竖直作业不当导致对墙体表面造成破坏;②槽底孔底淤积厚度过大,导致地下连续墙承载力降低;③槽底沉渣过厚导致超深地墙浇筑后表面沉降明显。

(5) 接头施工。圆形基坑超深地下连续墙轴线外放 30 cm 后直径为 9.55 m,周长 60.004 m。地连墙主要采用液压抓斗和铣槽机相互配合进行成槽施工,划分 14 个槽段。槽段连接采用铣接法。即铣掉先施工的地墙端头部分混凝土形成锯齿形搭接。

接头施工的风险因素主要包括:①接头铣接尺寸测量存在偏差;②接头处渗漏水。

(6) 钢筋笼制作及吊装。圆形基坑超深地下连续墙钢筋笼深约 96 600 mm(含吊筋长 2 600 mm)。其中,幅长 5 936 mm、幅宽 1 500 mm 的钢筋笼重达 127.41 t。实际钢筋笼各预弯角度必须与槽段相匹

配。由于地下连续墙超长超重而现场起吊能力有限,钢筋笼无法一次吊装完毕。所以现场钢筋笼采用整体制作,先期用直螺纹套筒连接成整体,待吊装时再将多段分开单独吊装。

钢筋笼制作及吊装的风险因素主要包括:①钢筋笼超重和超长的要求与现场施工场地、机械设备等不匹配;②钢筋笼焊点质量不佳造成吊装时骨架扭曲,笼体变形;③吊点设置不当,导致钢丝绳的偏载和钢筋笼的偏心;④钢筋笼整体平整度、垂直度偏差过大,造成吊放困难甚至卡笼;⑤限位方式不当,导致钢筋笼位置偏移;⑥钢筋导管导向钢筋焊接不牢固或导向钢筋搭接处未能平滑过渡,导致产生搭接台阶卡住浇筑导管;⑦钢筋笼保护层不满足设计要求。

(7) 混凝土浇筑。圆形基坑超深地下连续墙混凝土浇筑量大,浇筑时间长。现场施工采用多辆罐车同时浇筑,在灌注过程中,每30 min 测量一次槽孔内混凝土面深度,每隔2 h 测量一次导管埋深及管外混凝土面高度。

混凝土浇筑施工的风险因素有:①导管表面破损,密封性不好;②钢筋笼吊放就位后未能及时灌注混凝土,间隔时间过长导致泥浆护壁效果变差;③浇捣不连续,导管在混凝土终凝前未全部拔出,发生埋管;④拆管数量及浇筑深度计算有误导致导管脱离混凝土浇筑面,发生夹泥夹砂,后期地墙易产生渗漏水;⑤混凝土坍落度偏小,流动性不足,浇捣不及时发生堵管;⑥混凝土和易性差,发生离析,后期地墙质量不佳;⑦混凝土进入导管口过快,导管进料口溢出,落入槽段;⑧混凝土浇筑的速度过快,使混凝土下落冲出导管底口向上反冲,钢筋笼上浮。

4.2 基坑开挖过程风险源识别

根据目前工程案例可知,引起基坑的事故不仅仅是施工引起的,也与勘察、设计阶段考虑不全面有关。因此综合考虑,深基坑工程开挖阶段的安全性的影响因素主要包括以下几个方面。

(1) 地质情况更新。通过地质勘察对基坑开挖前地质条件进行排摸,确定岩土层分层界面,监控地下水水位变化范围。明确开挖涉及的岩土层物理力学参数取值,有条件时对特殊地层性质进行试验研究。

(2) 基坑降水施工。由于基坑开挖深度大,开挖范围内主要为粉质黏土、粉土、泥炭质土等含水率大,需布置降水并对坑内进行疏干降水。另外,坑内

降水后坑内外水头差大,极易导致地墙接缝等薄弱处被击穿造成渗漏,因此坑外针对粉土等承压含水层布置降压降水备用井,适当的降低坑外水位,减小水头压力。

(3) 基坑开挖方式。土方开挖遵循“竖向整体分节,单节竖向分层、水平分块、留土护壁、限时完成”的原则进行,每一层采取对称方式进行,由中间向两侧,逐段逐层开挖。上部-4.1 m ~ -50.0 m 采用整体逆作,局部顺作施工,下部-50.0 m ~ -77.5 m 深度范围内,采用全逆作法施工。

(4) 内衬结构施工。土方分层开挖与地下连续墙人工凿毛穿插进行,凿毛结束后,进行内衬结构底模安装、钢筋绑扎、钢模板就位调整,并一次浇筑成环。

4.3 本工程 LEC 法风险评价表

在地连墙施工过程与基坑开挖过程外,本次风险评估亦对起重吊装、模板工程、钢筋工程过程进行风险评估,碍于篇幅限制不再对其风险源进行一一叙述。根据图3及式(1),依据昆明地区其他类似基坑工程经验,并参考专家意见,对本工程59项风险源进行风险评价,其中三级以上风险源评价如表5所示。

由表5可知,滇中引水工程龙泉倒虹吸接收井超深圆形基坑工程59项风险源中二级风险源有3项,三级风险源有12项,重大风险源有3项。高风险主要集中于起重吊装过程,这是由于本工程为超深基坑,围护结构采用地下连续墙,基坑深度77.3 m,地连墙深度达到96.6 m,钢筋笼需要分节吊装,对钢筋笼吊点选定及设备选择方面有着重大考验,需要制定专项方案并对比论证。此外,在其他方面亦需制定相应风险控制措施,以保证风险处于可接受范围。

5 结 论

本文以滇中引水龙泉倒虹吸盾构接收井超深圆形基坑为例,首先分析了本工程基坑施工的难点,而后在对地连墙施工过程及基坑开挖过程进行风险识别的基础上,基于LEC法对本工程进行风险评估,结果表明本工程二级风险源有3项,三级风险源有12项,重大风险源有3项。以上风险因素的分析,有效确保了本工程的安全施工,对其他超深圆形基坑项目也具有一定的参考价值。

表 5 本工程 LEC 风险评价表(部分)

序号	作业活动	危险源名称	可能导致的故事/事件	L	E	C	D	风险等级	是否为重大风险源
1	钢筋工程	起吊钢筋笼时下方站人	起重伤害	3.0	3	15	135	三级	
2		超规模的起重吊装专项施工方案未按规定组织专家论证	起重事故	3.0	3	15	135	三级	
3		履带吊安装、拆除	起重事故	6.0	2	15	180	二级	√
4		司机未持有效证件上岗	起重事故	3.0	3	15	135	三级	
5	起重吊装	司索工、指挥信号工未持有效证件上岗	起重事故	3.0	2	15	90	三级	
6		大型吊装时无专人监护	起重事故	3.0	3	15	135	三级	
7		钢筋笼吊装	起重事故	6.0	3	15	270	二级	√
8		移动式起重机械进场后未组织验收	起重事故	3.0	2	15	90	三级	
9		使用前未对起重机械就位等工作进行验收	起重事故	3.0	2	15	90	三级	
10		地面铺垫措施达不到要求	起重事故	3.0	3	15	135	三级	
11	模板工程	施工方案缺乏或不符合要求	倒塌、物体打击等	1.0	10	7	70	三级	
12		防护措施缺乏或不符合要求	高处坠落等	3.0	6	7	126	三级	
13		施工造成燃气管线破坏	火灾、爆炸	0.5	6	40	120	三级	
14	基坑开挖、支护	未严格按照方案进行施工,造成基坑坍塌	坍塌	1.0	6	40	240	二级	√
15		基坑支撑、钢围檩掉落	物体打击	1.0	6	15	90	三级	

参考文献:

- [1] 王晓初,张天宇,刘 晓. 沈阳某深基坑支护工程事故原因分析[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2018,30(5):401-408.
- [2] 李 瑛,胡德军,叶向前,等. 基于事故分析的深基坑承压水突涌机理研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(3):943-948.
- [3] 熊 熙. 基坑事故风险因素分析及处理措施研究[J]. 黄冈职业技术学院学报,2019,21(4):148-150.
- [4] 李 佳. 软土地层深基坑事故原因分析[J]. 建筑技术,2019,50(3):309-311.
- [5] 王建波,牛发阳,赵 佳,等. 基于 DEA - AHP - BP 神经网络的地铁深基坑施工风险评估[J]. 建筑技术,2019,50(3):294-297.
- [6] 陈蓉芳,姜安民,董彦辰,等. 基于熵权可拓模型的深大基坑施工风险评估[J]. 数学的实践与认识,2019,49(2):311-320.
- [7] 张 锦,徐君翔. 川藏铁路桥隧施工安全风险评价[J]. 安全与环境学报,2020,20(1):39-46.
- [8] 吴 波,吴昱芳,黄 惟,等. 基于模糊综合判定法地铁深基坑施工安全风险评估[J]. 数学的实践与认识,2020,50(2):179-187.
- [9] 陈云超,杨平庆. 模糊综合评判在山区公路边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):202-206,229.
- [10] 徐 青,何 松,魏可可,等. 基于复杂网络理论的地铁深基坑施工事故致因研究[J]. 安全与环境工程,2017,24(1):152-157,161.
- [11] 林树枝,刘 洋. 厦门地铁车站的施工风险评估[J]. 福建建设科技,2015(3):51-55.
- [12] 吴昊城,王 浩,戴旭明. 工程高边坡开挖治理过程定量风险评估[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):134-139.
- [13] 陈绍清,熊思斯,何朝远,等. 地铁深基坑坍塌事故安全风险分析[J]. 安全与环境学报,2020,20(1):52-58.
- [14] 郭 亮,周 晶. 基于 LLE 非线性特征的 ANFIS 施工振动风险评估[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(4):110-114.
- [15] 杨瑞娟,梁腾飞,段英杰. 基于 LEC 法的地铁车站基坑明挖法施工风险识别与评估[J]. 中国设备工程,2018(11):193-194.