

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222534

基于专家可信度与 LEC-FCE 法的水利工程安全风险评价

陶飞飞^a, 皮妍玲^a, 蒋 勇^b

(河海大学 a. 计算机与信息学院; b. 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 水利工程施工存在现场复杂多变和作业难度高等特点,对危险源进行风险评价是安全分级管控的前提。传统作业条件危险性评价(LEC)法存在主观因素影响程度较大、危险源权重不明的缺陷。为此,引入专家可信度将风险评价主体之间的背景差异转换为定量分析,对主观缺陷进行改善修正;将模糊综合评价(FCE)法与 LEC 法相结合,建立风险评价指标体系,通过修正后的 LEC 法得到的风险值计算各指标权重,同时利用隶属度矩阵将定性的风险评价转化为定量的风险评价,解决了 LEC 法中权重不明的缺陷。利用该方法对新孟河延伸拓浚工程进行实例分析,证明该方法在风险评价的客观性方面有明显改善,为水利工程安全风险分级管控提供了科学依据。

关键词: 水利工程;安全风险评价;LEC法;FCE法;专家可信度

中图分类号: TV512

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0171-05

1 引言

水利工程施工危险性较高,其安全风险评价结果直接影响施工的顺利进行^[1]。目前,已有不少工程安全评价方法,并根据实际工程进行了优化^[2-3]。张秀丽^[4]通过对7个典型水利工程事故进行失事分析,认为安全评价是工程安全定期检查的重要过程;蒋迪等^[5]认为通过对施工危险源进行风险评价,可降低事故发生的概率,有效避免和预防安全生产事故的发生;李宗坤等^[6]从事事故概率、事故后果、评价准则和管理决策四个维度,验证了风险管理方法比传统方法更具科学性和高效性。传统的作业条件危险性评价(LEC)法中影响评价结果的因素较多,在大型项目中与实际结果偏差较大,不能全面地反映危险源的评价结果;单个评价指标的研究中,只考虑危险源本身的差异性,未考虑到危险评价主体的差异性。因此,本文引入专家可信度系数,将评价专家的背景差异进行量化,降低现有方法中主观因素对客观结果的影响程度,同时利用模糊数学理论,结合模糊综合评价(FCE)法对水利工程进行安全风险评价,得到更加科学的风险评价结果,从而辅助管理者提出有效的安全管控措施。

2 基于专家可信度的 LEC-FCE 法

2.1 改进评价法的原理

LEC法从三个维度评价危险源, L (likelihood)代表事故发生的可能性, E (exposure)代表人员暴露与危险环境中的频繁程度, C (consequence)代表一旦发生事故可能造成的后果程度,危险源的危险值 $D = LEC$ 。FCE法利用模糊数学中的隶属度理论实现定性评价到定量评价的转换,能较好地解决模糊的、难以量化的问题。LEC法中的评价指标和FCE法中的隶属度矩阵,均是根据专家主观经验所定。

在本文提出的改进评价法中,引入专家可信度对风险评价主体之间的背景差异进行定量转换,改善主观因素对客观结果的影响;利用隶属度矩阵将定性的风险评价转化为定量的风险评价,见图1。首先通过修正后的LEC法风险值 D 进行归一化操作计算各指标权重,然后将指标权重向量 X 与隶属度矩阵相乘,得到危险源的评价矩阵 B ,最后通过评价指标体系中建立的评价等级矩阵 Z ,定量计算出危险源的风险等级值 E 。

2.2 引入专家可信度

专家存在的信息结构性偏差和认知结构性偏

收稿日期: 2022-12-05, 修回日期: 2023-01-05

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020014);国家重点研发计划(2018YFC1508100);国家自然科学基金项目(42001250)

作者简介: 陶飞飞(1980-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为决策支持系统, E-mail: tffhhu@163.com

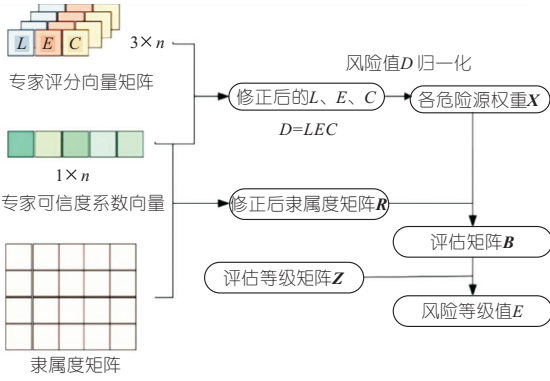


图 1 改进评价法的流程图

Fig. 1 Flow chart of improved evaluation method

差等问题,导致专家评价存在随机性和不一致性^[7]。本文专家评价的对象是项目施工的危险源,不同于科研基金项目评议,相比于专家的学术科研能力,完成该评价工作更需实践工作经验和能力,因此从三个维度对专家进行区间划分与分类,综合考虑专家组的全面专业技术水平,设定的专家分类标准见表 1。

表 1 专家分类标准

Tab. 1 Expert classification standard

专家分类标准	专家分类和取值
技术职称(满分 0.2)	技术员、助理工程师、工程师(+0.1)、高级工程师(+0.2)
专业研究时间(满分 0.4)	不少于五年(+0.2)、不少于七年(+0.3)、不少于十年(+0.4)
工作实践(评价)经验(满分 0.4)	有类似项目工程评价经验(+0.2)且累计次数超过 3 次(+0.4)

根据每位待评价专家的实际情况计算出各专家的可信度 ω_i , 而每位专家在专家组内权重 α_i 为:

$$\alpha_i = \omega_i / (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_n) \quad (1)$$

式中, n 为专家数量。

专家权向量 $\mathbf{W} = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n]$ 。

2.3 改进算法设计

2.3.1 计算评价指标权重

采用 LEC 法对项目中的所有危险源进行风险值 (D_{ij}) 确定, 根据现场实际情况, 组织专家及管理人员分别对风险源的 L_{ij}^m 、 E_{ij}^m 、 C_{ij}^m 确定评分, 而基于专家可信度修正后的 L_{ij} 、 E_{ij} 、 C_{ij} 可按下式计算:

$$L_{ij} = \sum_{m=1}^n \omega_m L_{ij}^m \quad (2)$$

$$E_{ij} = \sum_{m=1}^n \omega_m E_{ij}^m \quad (3)$$

$$C_{ij} = \sum_{m=1}^n \omega_m C_{ij}^m \quad (4)$$

式中, ω 为专家可信度权重。

得到每个危险源的风险值 D_{ij} :

$$D_{ij} = L_{ij} E_{ij} C_{ij} \quad (5)$$

根据危险源的风险值 D_{ij} 计算得到二级指标 U_{ij} 的权重 V_{ij} :

$$V_{ij} = D_{ij} / \sum_{j=1}^n D_{ij} \quad (6)$$

而二级指标 U_{ij} 的权重向量 \mathbf{X}_i 为:

$$\mathbf{X}_i = \{V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in}\} \quad (7)$$

通过对各一级项目指标下的二级项目指标风险值分别求和, 分别计算得到一级项目指标的整体风险值 D_i 、一级项目指标的权重 V_i 、一级项目指标的权重向量 \mathbf{X} :

$$D_i = \sum_{j=0}^n D_{ij} \quad (8)$$

$$V_i = D_i / \sum_{j=1}^n D_i \quad (9)$$

$$\mathbf{X} = \{V_1, V_2, \dots, V_n\} \quad (10)$$

2.3.2 建立风险评语集

结合项目现场安全管理风险的特点, 将现场安全管理的风险划分为 5 个等级, 并分别进行赋值, 则建立评语集 $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5\} = \{\text{可忽略风险, 可允许风险, 中度风险, 重大风险, 不容许风险}\}$, 评价等级矩阵 $\mathbf{Z} = [1, 2, 3, 4, 5]^T$ 。

将风险源的隶属度矩阵与评价等级矩阵相乘, 能将风险源的定性评价转化为定量的风险等级, 详细的等级划分见表 2。

表 2 风险等级划分标准

Tab. 2 Risk classification standard

等级	可忽略风险	可允许风险	中度风险	重大风险	不容许风险
分值	(0,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5]

2.3.3 建立隶属度矩阵

某个危险源 U_i 的隶属度元组为 $r_{ik} = \{r_{1k}, r_{2k}, r_{3k}, r_{4k}, r_{5k}\}$, 由专家 k 评审确定, r_{ik} 表示该专家 k 认为该危险源风险等级为 Y_i 的概率。某个危险源 U_i 最终的隶属度元 $r_i = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5\}$ 按下式计算:

$$r_i = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5\} = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n] \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{51} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{n5} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, α_i 为某位专家在该专家组中的权重, 而各二级指标的隶属度向量为 $\mathbf{R}_i = [r_1, r_2, \dots, r_j]^T$ 。

2.3.4 确定风险等级

根据项目指标权重和隶属度矩阵, 计算出各二级项目指标的评价矩阵, 公式为:

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{X}_i \mathbf{R}_i \quad (12)$$

式中, \mathbf{X}_i 为二级项目指标的权重向量; \mathbf{R}_i 为二级

项目指标的隶属度矩阵。

通过评价矩阵和评价等级矩阵相乘,可将评价矩阵转化为对应确定的风险等级值 E_i :

$$E_i = B_i Z \quad (13)$$

式中, B_i 为二级项目指标的评价矩阵; Z 为评价等级矩阵。

3 实例分析

3.1 工程概况

新孟河延伸拓浚工程是根据《太湖流域水环境综合治理总体方案》确定的具有防洪、排涝、水资源配置、水生态改善等综合效益的骨干工程,北起长江右岸的大夹江,在引江口处兴建界牌水利枢纽,沿老新孟河拓浚至京杭运河。项目工程规模较大,涉及施工人员众多。因此,开展安全风险管控,降低事故发生的可能性,保障工程的长治久安非常有意义。

3.2 专家权重向量计算

以新孟河工程常州市新北区境内工程为例,邀请十位水利工程建设行业的专家组成评价组进行风险评价赋分,根据专家可信度评价准则,按表 1 赋予对应的专家可信度,见表 3。

表 3 专家可信度详情

Tab. 3 Details of expert credibility

专家序号	技术职称	专业研究时间	工作实践(评价)经验	可信度
1	工程师	五年	有且累计数超过 3 次	0.7
2	助理工程师	八年	有	0.5
3	高级工程师	四年	无	0.2
4	高级工程师	五年	有且累计数超过 3 次	0.8
5	技术员	七年	有	0.5
6	高级工程师	七年	有且累计数超过 3 次	0.9
7	技术员	九年	有	0.5
8	工程师	八年	有且累计数超过 3 次	0.8
9	工程师	七年	有	0.6
10	高级工程师	十年	有且累计数超过 3 次	1.0

根据表 3 评价结果,按式(1)计算可得该项目专家组的风险评价权重向量 W 为:

$$W = [0.11, 0.08, 0.03, 0.12, 0.08, 0.14, 0.08, 0.12, 0.09, 0.15] \quad (14)$$

3.3 风险评价指标体系构建

为了有效减少项目实施过程中的不确定性和有效提高风险管控的效率,选取新孟河工程实施过程中的风险源划分级别,形成规范的风险指标体系,见表 4。

3.4 基于改进算法的风险评价

3.4.1 计算评价指标权重

根据已建立的安全管理风险评价指标体系,

表 4 工程安全风险评价指标体系

Tab. 4 Evaluation index system of hydraulic engineering safety risk

一级指标	二级指标	三级指标(危险源)
夏季施工与防汛 U_1	防暑降温 U_1	夏季作业未调整作息时间 U_{11}
		施工现场和露天场所,未做解暑准备 U_{12}
		室内作业未配备降温设施 U_{13}
		夏季施工未避开高温时段或采取降温措施 U_{14}
施工安全 U_2		夏季施工未采取防暴雨等措施 U_{21}
		∴
		电源线在潮湿的环境中拖拉 U_{27}
防洪度汛 U_3		建设单位未组织成立工程防汛机构 U_{31}
		∴
		汛期未与上级和政府防汛部门联系 U_{312}

组织专家分别对各危险源进行 LEC 法风险评价。借助专家组的风险评价权重向量 W ,按式(2)~(4)对传统 LEC 法的三个维度指标进行修正,评价结果见表 5。

表 5 各级危险源评价结果

Tab. 5 Evaluation results of different hazard sources

指标	L	E	C	D	D_i	二级权重	一级权重
U_{11}	3.53	5.72	6.24	125.995 6	446.913 4	0.281 9	0.280 3
U_{12}	3.96	5.19	6.20	127.424 9		0.285 1	
U_{13}	5.37	5.04	4.40	119.085 1		0.266 5	
U_{14}	3.59	5.08	4.08	74.407 8		0.166 5	
U_{21}	3.78	1.00	16.23	61.349 4	445.301 8	0.137 8	0.279 3
∴	∴	∴	∴	∴		∴	
U_{27}	2.32	2.81	7.48	48.763 6		0.109 5	
U_{31}	2.83	1.03	12.55	36.582 0	701.932 8	0.052 1	0.440 3
∴	∴	∴	∴	∴		∴	
U_{312}	2.99	1.17	15.28	53.454 0		0.076 2	

各危险源指标权重可按式(6)、(7)计算,根据表 5 的计算数据可知,各危险源指标的权重向量分别为:

$$X_1 = [0.281 9, 0.285 1, 0.266 5, 0.166 5] \quad (15)$$

$$X_2 = [0.137 8, 0.097 1, 0.088 6, 0.488 4, 0.263 9, 0.254 7, 0.109 5] \quad (16)$$

$$X_3 = [0.052 1, 0.067 3, 0.067 9, 0.550 0, 0.060 8, 0.067 4, 0.128 7, 0.140 5, 0.129 0, 0.073 6, 0.081 5, 0.076 2] \quad (17)$$

各二级项目指标权重可通过对其所属的危险源风险值求和,再对二级指标风险值求和,该二级指标风险值所占的比重即为其指标权重(式(8)~(10)),根据表 5 的计算结果,二级项目指标的权重向量 X 为:

$$X = [0.280 3, 0.279 3, 0.440 3] \quad (18)$$

3.4.2 构建隶属度矩阵

组织项目风险评价专家组确定项目指标的隶属度矩阵,借助计算的项目专家风险评价权重向量 W ,按式(11)计算,得到各危险源修正后的隶属度向量,而各二级指标的隶属度矩阵由各危险

源的隶属度向量组成,可得防暑降温 U_1 、施工安全 U_2 及防洪度汛 U_3 的隶属度矩阵 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.088, 0.231, 0.372, 0.245, 0.064 \\ 0.076, 0.208, 0.459, 0.245, 0.012 \\ 0.099, 0.254, 0.422, 0.214, 0.011 \\ 0.215, 0.397, 0.290, 0.097, 0.009 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.329, 0.468, 0.167, 0.028, 0.008 \\ 0.311, 0.586, 0.100, 0.003, 0.000 \\ 0.302, 0.455, 0.176, 0.040, 0.000 \\ 0.355, 0.413, 0.215, 0.017, 0.000 \\ 0.124, 0.289, 0.319, 0.181, 0.058 \\ 0.165, 0.260, 0.350, 0.153, 0.072 \\ 0.314, 0.451, 0.179, 0.056, 0.000 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.353, 0.424, 0.124, 0.081, 0.018 \\ 0.395, 0.327, 0.177, 0.066, 0.023 \\ 0.308, 0.341, 0.243, 0.085, 0.023 \\ 0.366, 0.369, 0.187, 0.063, 0.015 \\ 0.383, 0.377, 0.198, 0.042, 0.000 \\ 0.371, 0.424, 0.133, 0.072, 0.000 \\ 0.095, 0.350, 0.393, 0.089, 0.073 \\ 0.048, 0.316, 0.447, 0.104, 0.085 \\ 0.129, 0.253, 0.399, 0.155, 0.064 \\ 0.390, 0.390, 0.168, 0.040, 0.012 \\ 0.343, 0.362, 0.188, 0.101, 0.006 \\ 0.352, 0.448, 0.116, 0.067, 0.017 \end{bmatrix}$$

3.4.3 确定风险等级

以危险源 U_{11} 为例,该危险源最终具体的风险等级值 $E_{11} = r_{11}Z = 2.966$,对照风险等级表(表 2)可知,危险源 U_{11} 夏季作业未调整作息时间的风险评价结果为 $Y_3 =$ 中度风险。

对于各危险源,直接将其隶属度向量与评价等级矩阵相乘,得到该危险源的风险等级 E_{ij} 值,见表 6。

表 6 各危险源风险等级

Tab. 6 Risk levels of different hazard sources

指标	E_{ij}	风险等级	指标	E_{ij}	风险等级	指标	E_{ij}	风险等级
U_{11}	2.966	Y_3	U_{25}	2.673	Y_3	U_{36}	1.906	Y_2
U_{12}	2.909	Y_3	U_{26}	2.707	Y_3	U_{37}	2.695	Y_3
U_{13}	2.784	Y_3	U_{27}	1.977	Y_2	U_{38}	2.862	Y_3
U_{14}	2.312	Y_3	U_{31}	1.987	Y_2	U_{39}	2.772	Y_3
U_{21}	1.918	Y_2	U_{32}	1.959	Y_2	U_{310}	1.894	Y_2
U_{22}	1.795	Y_2	U_{33}	2.174	Y_3	U_{311}	2.065	Y_3
U_{23}	1.900	Y_2	U_{34}	1.992	Y_2	U_{312}	1.949	Y_2
U_{24}	1.894	Y_2	U_{35}	1.899	Y_2			

对于二级项目指标,按式(12)计算得到该二级项目指标的评价向量,可按式(13)计算得出该二级项目指标的风险等级 E_i 值,具体数据见表 7。

表 7 各二级项目指标评价向量

Tab. 7 Evaluation vectors of secondary indexes

指标	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	风险值 E_i	风险等级
U_1	0.109	0.259	0.397	0.212	0.026	2.795	Y_3
U_2	0.229	0.374	0.252	0.101	0.035	2.312	Y_3
U_3	0.254	0.354	0.268	0.088	0.037	2.302	Y_3

各二级项目指标整体的风险等级评价结果可通过表 7 的详细结果进行整理分析。以防暑降温 U_1 为例,整个二级项目指标的评价向量为:

$$B_1 = [0.109, 0.259, 0.397, 0.212, 0.026] \tag{19}$$

数据分析可得,专家组认为 U_1 指标属于“中度风险”的概率最高为 0.397,经与评价矩阵相乘精确化后, U_1 的具体风险值为 2.795。对照风险等级表(表 5)可知,防暑降温 U_1 二级项目指标整体的风险评价结果为 $Y_3 =$ 中度风险。同样的分析过程可得出, U_2 、 U_3 的具体风险值分别为 2.312、2.302。

3.5 算法改进分析对比

以三级指标 U_{12} 为例,对改进算法进行对比分析。在无专家可信度系数时,以 10 位专家的算数平均数为最终评分,对比分析引入专家可信度系数两者导致的偏差,见表 8。表 8 中, σ_1 、 σ_2 分别为改进前、后各专家评分与最终评分的绝对偏差。当 $\sigma_1 > \sigma_2$ 时,表示未引入专家可信度导致的偏差大于引入专家可信度导致的偏差,那么认为引入专家可信度改进有效。由表 8 可知,在 U_{12} 指标中改进有效数据个数为 19,超过 63%,在一级指标 U_1 中改进有效数据个数为 71,约为 60%。因此,证明引入专家可信度系数在改善数据的客观性是有效的。

表 8 算法对比分析

Tab. 8 Algorithm comparison and analysis

专家序号	L			E			C		
	取值	σ_1	σ_2	取值	σ_1	σ_2	取值	σ_1	σ_2
1	3	1.20	0.96	6	1.20	0.81	7	1.20	0.8
2	3	1.20	0.96	3	1.80	2.19	7	1.20	0.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	3	1.20	0.96	6	1.20	0.81	7	1.20	0.8
平均数	4.20			4.80			5.80		
改进后	3.96			5.19			6.20		

4 结论

a. 改进后的评价法能精确计算各危险源的风险等级值 E_i 和风险等级描述评语,使处于同一风险等级的危险源之间明显分出差别(如 $E_{311} = 2.065$ 和 $E_{11} = 2.966$),评价结果更加全面、科学。

b. 解决了 LEC 法中权重不明的缺陷,引入专家可信度防止单个专家过度影响风险评价结果,改善了主观因素对客观评价结果的影响,为水利工程安全风险分级管控提供了依据。

参考文献:

[1] 向玉华,陈云,郑霞忠.受限空间灌浆作业安全风险云模糊综合评价[J].水电能源科学,2016,34(2):140-144.

[2] ONUR HASTURK,DAVID L KAPLAN. Cell armor for protection against environmental stress:Advances, challenges and applications in micro-and nanoencapsulation of mammalian cells[J]. Acta biomaterialia,2019,95:3-31.

[3] CERVI GUSTAVO , HENRIQUE, SOMENSI RUTE MERLO, et al. Project and preliminary evaluation of SimHosp, a tool for decision making in nursing [J]. Studies in health technology and informatics, 2019,264:541-545.

[4] 张秀丽.国内外大坝失事或水电站事故典型案例原因汇集[J].大坝与安全,2015(1):13-16.

[5] 蒋迪,信永达,杨帆.水利工程安全生产风险管理体系建设[J].东北水利水电,2022,40(9):56-57.

[6] 李宗坤,葛巍,王娟,等.中国大坝安全管理与风险管理的战略思考[J].水科学进展,2015,26(4):589-595.

[7] 赵亚娟.专家群评价结果可信度分析与检验[J].中国科学技术大学学报,2016,46(2):165-172.

Hydraulic Engineering Safety Risk Assessment Based on Expert Credibility and LEC-FCE Method

TAO Fei-fei^a, PI Yan-ling^a, JIANG Yong^b

(a. College of Computer and Information; b. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the complex and changeable construction site and high difficulty in construction of water conservancy safety, the risk assessment of all hazard sources is the premise of safety control of a project. The traditional LEC method has the defects of large influence of subjective factors and unclear weight of each hazard source. Based on the introduction of expert credibility, the background differences between risk evaluation subjects were converted to quantitative analysis, and the subjective impairments was modified. This paper combined fuzzy comprehensive evaluation method with traditional LEC method to establish the risk evaluation index system. By calculating every index weight factor with the modified risk values in LEC method, the risk assessment was converted from qualitative to quantitative by membership degree matrix and the defection of imprecise weight factor in LEC method was solved. Finally, a verification of Xinmeng River shows that the objectivity of risk assessment of hazard sources has been improved significantly through the modified method, which provides scientific basis for the risk hierarchical control of water conservancy safety.

Key words: hydraulic engineering; safety risk assessment; LEC method; FCE method; expert credibility

(上接第 170 页)

Analysis of Grouting Construction Quality Management of Wuyue Pumped Storage Power Station

CHEN Zheng-wei, HU Wang-xing

(Henan Xinhua Wuyue Pumped Storage Power Generation Co. , Ltd. ,Xinyang 464000, China)

Abstract: To prompt grouting construction quality management of Wuyue Pumped Storage Power Station, combining with exposed geological conditions after excavation, designed grouting parameters, this paper conducts grouting test, and determines the grouting process parameters. The introduction of intelligent grouting system can reduce labor intensity of workers and the labor cost, and improve the traceability of quality work, save the construction period. The introduction of third-party testing units brings advanced technology and management experience, and improves the credibility of testing results. Using the results of water pressure test and comparative analysis of wave velocities of different types of rock masses can evaluate the grouting quality. The evaluation results are mutually verified, which improves the persuasiveness of the grouting effect. The grouting project has achieved satisfactory results for all parties involved in the construction, and this grouting construction process management experience can be a reference for similar projects.

Key words: intelligent grouting; test; third party test; quality evaluation; satisfaction