

基于 DEMATEL-ISM 的泵送混凝土堵管事故 风险因素分析

康 真¹, 谢洪涛¹, 常 凯²

(1. 昆明理工大学 管理与经济学院, 昆明 650504;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘要:作为高层建筑施工的关键性环节,泵送混凝土质量影响因素复杂。以泵送混凝土堵管事故风险因素为研究对象,构建 DEMATEL-ISM 模型,明确影响堵管事故风险的关键因素及各因素间的层级结构和作用机理。结果表明:泵送混凝土堵管事故风险的 22 个影响因素可划分为 4 个层级,其中混凝土配合比合理性是影响堵管事故风险最核心最根本的因素,对其他因素的影响程度最大;混凝土施工流动性、输出压力稳定性和管道光滑度对堵管事故风险的影响作用最直接。

关键词:泵送混凝土;堵管事故风险;DEMATEL-ISM;层级结构

中图分类号:TU712+.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)06-0264-06

随着建筑物高度的不断增加,泵送混凝土成为混凝土输送的主要方式。随着混凝土泵送高度的增加,泵送过程中不可避免地会发生堵管事故^[1],不仅对工程进度、施工效率和施工质量产生负面影响,而且会危及人们的生命财产安全^[2]。

作为高层建筑施工的关键性环节,泵送混凝土的泵送质量影响因素复杂,且后果严重^[3-4],因而对泵送混凝土的施工质量控制,有必要建立“预防为主”的事前控制体系。因此,对泵送混凝土堵管事故风险的影响因素进行识别,分析因素的层级结构及作用路径,找出关键影响因素并提出针对性防治措施,对于预防堵管事故的发生,保障工期、提高施工质量均具有重要意义。

已有研究表明混凝土可泵性是泵送混凝土的关键质量指标,同时也指出了影响混凝土可泵性的主要影响因素,为泵送混凝土质量控制奠定了良好的基础,但对于影响因素间的相互关系和作用机理的研究很少^[5],也还未能建立各影响因素与泵送混凝土堵管事故之间的因果关系,导致堵管事故发生后难以快速准确地找到事故原因,延长了质量事故处理周期。因此,揭示多重因素导

致混凝土堵管事故发生的链式致因机理,构建多要素引发混凝土堵管事故的因果链模型至关重要。以影响混凝土堵管事故风险的因素为输入指标,可泵性为输出指标,通过构建 DEMATEL-ISM 模型对泵送混凝土堵管事故成因进行分析,判断事故风险影响因素的逻辑关系并划分层级^[6],能够为快速判别混凝土泵送质量事故成因以及通过事前预防减少堵管事故发生,提供应对措施和决策依据。

1 泵送混凝土堵管事故风险因素识别

分析泵送混凝土堵管事故风险因素的层次结构是一项复杂的系统工程,首先需要有效识别系统中的风险因素,建立科学合理的指标体系^[7]。通过文献计量法,在 CNKI 数据库中检索“泵送混凝土”和“可泵性”等关键词,将期刊级别限定为核心期刊及以上,共筛选出 69 篇有关泵送混凝土堵管事故风险影响因素的文献。咨询业界专家并梳理代表性文献,分类与整合涉及泵送混凝土堵管事故风险的影响因素,最终确立 4 个层次 22 个因素构成的影响指标体系,分别将其编号为 $X_i (i=1, 2, \dots, 22)$,见表 1。

收稿日期:2022-11-03

基金项目:国家自然科学基金(71942006)。

作者简介:康真(1997—),女,陕西西安人,昆明理工大学管理与经济学院,硕士研究生,研究方向为混凝土施工质量管理;谢洪涛(1974—),男,湖南涟源人,昆明理工大学管理与经济学院,教授,博士,研究方向为技术创新管理、项目管理;常凯(1990—),男,河南商丘人,中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所,助理研究员,硕士,研究方向为隧道工程。

表 1 泵送混凝土堵管事故风险因素

一级影响因素	二级影响因素	因素编号
混凝土质量	混凝土配合比合理性	X_1
	混凝土坍落度	X_2
	混凝土初始流动性	X_3
	混凝土黏聚性	X_4
	混凝土离析情况	X_5
	流动性经时损失	X_6
	混凝土施工流动性	X_7
泵送设备	泵机性能	X_8
	输出压力	X_9
	压力损失	X_{10}
	管道平顺性	X_{11}
	管道密封性	X_{12}
	管道倒用次数	X_{13}
	管道磨损度	X_{14}
人员操作	管道光滑度	X_{15}
	工人技术水平	X_{16}
	操作稳定性	X_{17}
	管道维护水平	X_{18}
	泵送前润滑情况	X_{19}
外部环境	空气温度	X_{20}
	空气湿度	X_{21}
	运输时间	X_{22}

2 基于 DEMATEL-ISM 模型的泵送混凝土堵管事故风险因素层级划分

2.1 研究方法

决策试验和评价实验室(DEMATEL)法通过专家评定系统因素间相互影响关系,来评价因素对其他因素以及系统的综合影响。它通过建立直接关系矩阵,计算分析各因素间的影响度、被影响度、中心度和原因度,来识别系统的关键核心要素。解释结构模型(ISM)法是 1973 年由美国学者提出的一种明确复杂系统因素间逻辑关系的系统结构方法。它将复杂的系统分解为若干子系统,利用矩阵运算将系统打造成一个多层次解释结构模型,明确因素间的层次结构,从而识别出系统的根本因素。

同样作为复杂系统科学分析的重要工具,DEMATEL法和 ISM 法各有其优势与局限。集成两种方法,能有效降低建模的计算量和计算复杂度,便于系统分析,目前已在工程施工领域的理论实践研究中得到了广泛使用^[8]。集成后的 DEMATEL-ISM 模型的建模步骤如图 1 所示^[9]。

2.2 模型构建

2.2.1 建立直接影响矩阵

根据表 1 中的影响因素,建立泵送混凝土堵管事故风险影响因素间相互作用程度打分表,打分规

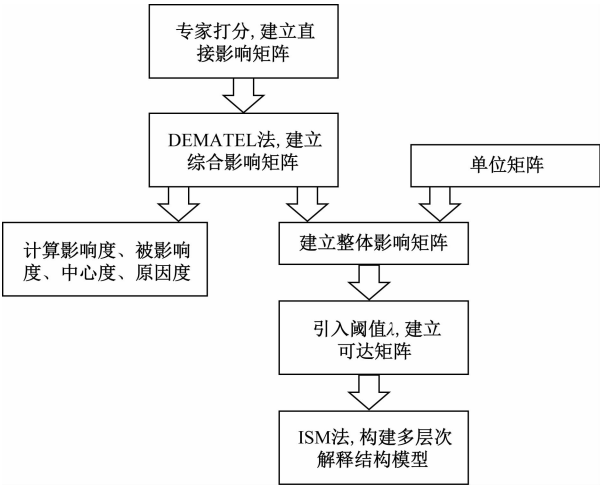


图 1 DEMATEL-ISM 模型的建模步骤

则按照传统 DEMATEL 方法的 0~3 分制,0 代表无影响,1 代表影响较小,2 代表影响较大,3 代表影响很大,其中,因素对自身的影响值为 0。邀请专家打分确定要素间的直接影响关系值 A_{ij} ,构建系统要素的直接影响矩阵 $A^{[10]}$,见表 2。

2.2.2 建立综合影响矩阵

对直接影响矩阵 A 的每一行因素进行求和,找出所有行和的最大值,用直接影响矩阵中的每一个因素 A_{ij} 除以这个最大值,得到规范化影响矩阵 B 。

$$B = \frac{A}{\max \sum_{j=1}^{22} A_{ij}} \tag{1}$$

将规范化影响矩阵通过以下公式计算得出综合影响矩阵 T 。

$$T = B(I - B)^{-1} \tag{2}$$

式中: I 为单位矩阵; $(I - B)^{-1}$ 为 $I - B$ 的逆矩阵。

2.2.3 计算各要素的影响度、被影响度、中心度和原因度

在综合影响矩阵 T 的基础上,加总矩阵 T 中每个因素 X_i 的行因素得到该因素的影响度 D_i ,反映了该因素对系统中其他因素的影响程度。

$$D_i = \sum_{j=1}^{22} T_{ij}, i = 1, 2, \dots, 22 \tag{3}$$

同理,加总矩阵 T 中每个因素 X_i 的列因素得到该因素的被影响度 C_i ,反映了该因素受系统中其他因素的影响程度。

$$C_i = \sum_{j=1}^{22} T_{ji}, i = 1, 2, \dots, 22 \tag{4}$$

表 2 系统要素的直接影响矩阵 A

A	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂
X ₁	0	3	3	3	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₂	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₃	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₄	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₅	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₆	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₇	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₈	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₉	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₁₀	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₁₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₁₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₁₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0
X ₁₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
X ₁₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₁₆	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
X ₁₇	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₁₈	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
X ₁₉	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
X ₂₀	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₂₁	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₂₂	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

将影响度和被影响度相加得到该因素的中心度 M_i ,反映了该因素在系统中的重要程度,中心度的数值大小与该因素对泵送混凝土堵管事故风险的影响程度大小成正比。

$$M_i = D_i + C_i, i = 1, 2, \cdots, 22 \tag{5}$$

两者相减得到该因素的原因度 R_i ,反映其因果属性,以及对其他因素的影响程度大小。以 0 作为分界点,原因度的数值大于 0 是原因因素,小于 0 是结果因素,等于 0 则是独立因素。

$$R_i = D_i - C_i, i = 1, 2, \cdots, 22 \tag{6}$$

计算结果见表 3。

2.2.4 建立可达矩阵

综合影响矩阵 T 与单位矩阵 I 相加得到整体影响矩阵 E 。为了获得最优系统结构,在整体影响矩阵的基础上,引入阈值 λ ,分别取 0.05、0.1、0.2,对比分析不同阈值下各影响因素的节点度(即可达矩阵中该因素所在行与列的和)。以节点度大小利于因素层级结构划分为目标,经过反复筛选斟酌,选定 $\lambda = 0.05$,计算得到可达矩阵 D 。

$$D_{ij} = \begin{cases} 1, & E_{ij} \geq \lambda \\ 0, & E_{ij} < \lambda \end{cases}, i, j = 1, 2, \cdots, 22 \tag{7}$$

2.2.5 构建多层次 ISM 模型

根据可达矩阵,确定各个因素对应的可达集

表 3 影响度、被影响度、中心度和原因度

因素	影响度	被影响度	中心度	原因度	中心度排序	因素属性
X ₁	1.203	0	1.203	1.203	1	原因因素
X ₂	0.260	0.214	0.474	0.046	9	原因因素
X ₃	0.214	0.474	0.689	-0.260	4	结果因素
X ₄	0.260	0.214	0.474	0.046	10	原因因素
X ₅	0.214	0.474	0.689	-0.260	5	结果因素
X ₆	0.143	0.500	0.643	-0.357	6	结果因素
X ₇	0	1.203	1.203	-1.203	2	结果因素
X ₈	0.214	0	0.214	0.214	18	原因因素
X ₉	0	0.724	0.724	-0.724	3	结果因素
X ₁₀	0.214	0.286	0.500	-0.071	8	结果因素
X ₁₁	0.173	0	0.173	0.173	19	原因因素
X ₁₂	0.173	0	0.173	0.173	20	原因因素
X ₁₃	0.403	0	0.403	0.403	12	原因因素
X ₁₄	0.214	0.214	0.429	0	11	独立因素
X ₁₅	0	0.617	0.617	-0.617	7	结果因素
X ₁₆	0.235	0	0.235	0.235	15	原因因素
X ₁₇	0.143	0.143	0.286	0	14	独立因素
X ₁₈	0.143	0	0.143	0.143	21	原因因素
X ₁₉	0.071	0	0.071	0.071	22	原因因素
X ₂₀	0.235	0	0.235	0.235	16	原因因素
X ₂₁	0.235	0	0.235	0.235	17	原因因素
X ₂₂	0.316	0	0.316	0.316	13	原因因素

$R(X_i)$ 、先行集 $A(X_i)$ 及二者的交集 $R(X_i) \cap A(X_i)$ 。依据层次划分标准,当 $R(X_i) \cap A(X_i) =$

$R(X_i)$ 时,划分出矩阵的第 1 层级,然后删除第 1 层级因素所属的行和列,得到新的矩阵并重复上述操作过程,直到所有的影响因素都被提取完毕,划分为不同的级别。结果得到 4 个层级的因素集,第 1 层因素为 $\{X_7、X_9、X_{15}\}$,第 2 层因素为 $\{X_3、X_5、X_6、$

$X_8、X_{10}、X_{14}、X_{17}、X_{18}、X_{19}\}$,第 3 层因素为 $\{X_2、X_4、X_{11}、X_{12}、X_{13}、X_{16}、X_{20}、X_{21}、X_{22}\}$,第 4 层因素 $\{X_1\}$ 。最后,根据层级划分结果,用有向边连接各层级因素,得到泵送混凝土堵管事故风险影响因素层次结构图,如图 2 所示。

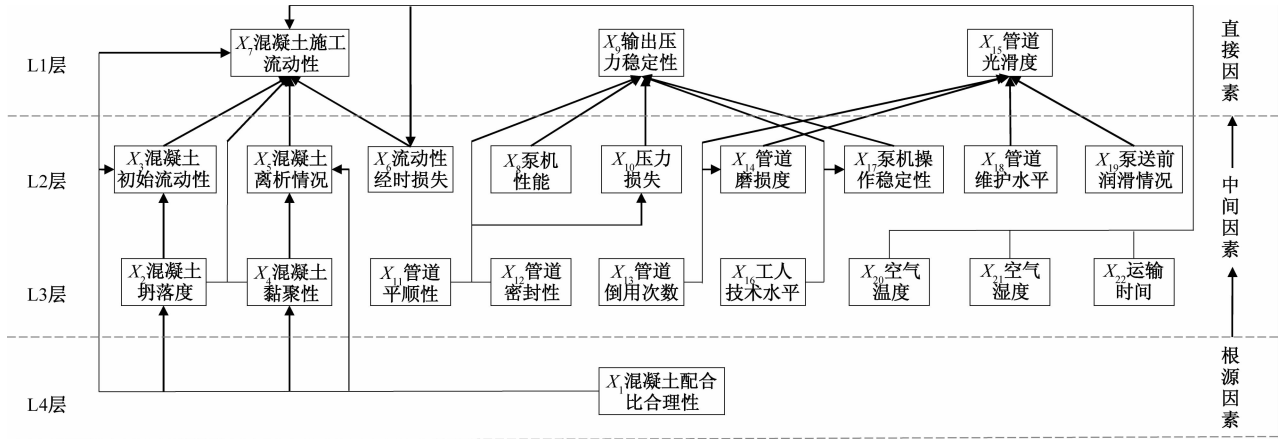


图 2 泵送混凝土堵管事故风险影响因素的 ISM 模型

3 模型结果分析

3.1 基于 DEMATEL 法的关键因素分析

3.1.1 影响度与被影响度分析

图 3 的结果表明:在影响度方面,混凝土配合比合理性(X_1)的影响度最大,遥遥领先于其他因素,能够在很大程度上对其他因素产生影响;在被影响度方面,混凝土施工流动性(X_7)、输出压力稳定性(X_9)、管道光滑度(X_{15})是被影响度最大的 3 个因素,其影响度均为 0,最容易受到其他因素的影响。

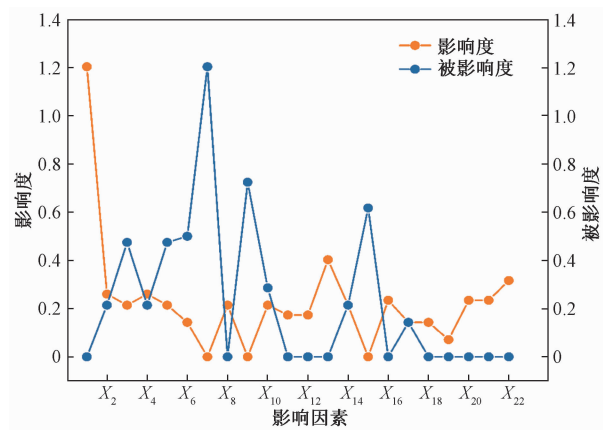


图 3 影响度与被影响度

3.1.2 中心度和原因度分析

根据表 3 的数据,在中心度排序中,排名前 3 的分别是混凝土配合比合理性(X_1)、混凝土施工流动性(X_7)和输出压力稳定性(X_9),这些因素在堵管事

故系统中占据核心地位,是影响泵送混凝土堵管事故风险的关键因素,也是预防施工过程中发生堵管事故的重要突破口。此外,混凝土初始流动性(X_3)、混凝土离析情况(X_5)、流动性经时损失(X_6)、管道光滑度(X_{15})等因素也都在堵管事故系统中起着重要的主导作用。不仅如此,在分析系统各要素的基础上,可对 4 个维度要素的中心度展开分析^[11]。从系统要素的 4 个维度来看,影响堵管事故风险的核心因素大多属于混凝土质量维度,可见,良好把控混凝土质量是有效预防堵管事故发生的重要保证^[12]。

对原因度的分析发现,泵送混凝土堵管事故风险影响因素中,包含 13 个原因因素、7 个结果因素和 2 个独立因素。图 4 的结果表明,混凝土配合比合理性(X_1)是原因度最大的因素,对其他要素影响程度最大。相反,混凝土施工流动性(X_7)的原因度最小,意味着最容易受到其他要素的影响,需要加以特别重视。不仅如此,因素中还存在两个相对独立的风险因素,即管道磨损度(X_{14})和泵机操作稳定性(X_{17}),它们既不影响其他因素也不易受其他因素的影响,是泵送混凝土项目堵管风险管理工作中需要特别关注的重要因素。

3.2 基于 ISM 法的关键因素分析

泵送混凝土堵管事故发生风险是一个复杂的系统,多个事故成因之间存在内在联系,具有多层级递阶的结构关系。根据图 2 的模型结果,泵送混

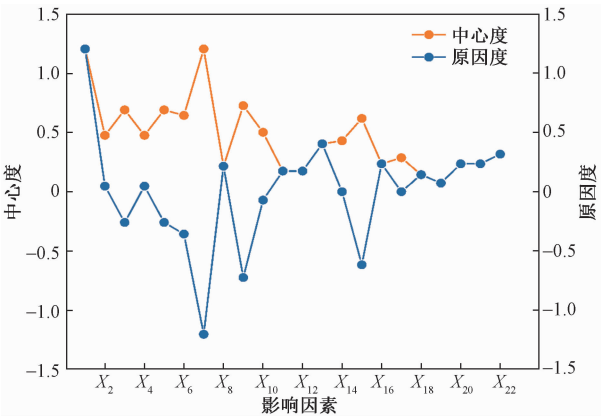


图 4 中心度与原因度

凝土堵管事故风险的影响因素可划分为 4 个因果层次, L1 为直接因素, L2、L3 为中间因素, L4 为根源因素。其中, 混凝土施工流动性(X_7)、输出压力稳定性(X_9)、管道光滑度(X_{15})为第一层级因素, 直接影响堵管事故的发生风险和发展程度, 在系统风险水平较高时, 及时采取针对性有效措施, 能够在短时间内得到立竿见影的效果, 但具体实施往往控制难度较大, 难以达到预期效果。混凝土配合比合理性(X_1)是唯一的根源因素, 在堵管事故风险系统中发挥根本性作用, 因此, 有效控制根源因素的影响效果是降低泵送混凝土堵管事故发生风险的关键, 需要足够的重视, 否则堵管事故风险防治很难从根源上得到有效的治理。不仅如此, 在改善影响因素以求降低堵管事故发生风险时, 调整的顺序应该由根源因素向直接因素进行改善。

4 研究结论

构建泵送混凝土堵管事故风险因素的 DEMATEL 模型, 确定了各个因素的因果属性, 明确了影响堵管事故风险的核心因素; ISM 模型揭示了 22 个风险因素间的作用机理以及在整个系统中的层次结构关系。结果发现:

1) 混凝土配合比合理性是影响泵送混凝土堵管事故发生最核心最根本的因素, 对系统中其他因素的影响程度最大。因此, 提高混凝土的可泵性, 混凝土配合比合理性必须作为优先重点, 并强化对混凝土原材料选择以及配合比调配的重视程度^[13]。并且, 项目施工单位应严格执行施工要求, 确保用于泵送的混凝土具有良好的可泵性, 满足泵送要求。

2) 混凝土施工流动性、输出压力稳定性和管道光滑度是最容易受到其他因素影响的因素, 处在 ISM 模型顶层, 对堵管事故风险的影响作用是最直

接的。操作人员可以在执行泵送任务前, 通过检验混凝土的流动性能状态^[14]、泵送设备的输出压力性能以及泵管内部的结块情况, 有效降低堵管事故的发生风险^[15]。

在实际泵送混凝土施工过程中, 堵管事故成因众多, 或是单一因素导致, 亦或是多种因素综合作用。只要针对影响混凝土泵送出现堵管的重要因素, 制定科学合理的预防措施, 必定能够得到很大程度的降低堵管风险, 减少堵管事故发生。

参考文献

[1] 李悦, 田小璇, 金彩云. 基于 CFD 的泵送混凝土流变性能数值模拟研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(4): 1139-1144, 1152.

[2] 鲁惠敏, 杜婷, 王本武. 基于集对理论的混凝土泵送施工堵管风险评价[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(4): 1599-1606.

[3] 唐开军. 超高泵送混凝土技术在超高层建筑工程中的应用研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(5): 166.

[4] 杜婷, 刘顶勇, 石雯. 建设项目混凝土泵送全过程质量管理体系研究[J]. 混凝土, 2021(3): 96-98, 102.

[5] 陈立文, 张孟佳, 李素红. 基于 DEMATEL-ISM 的既有建筑节能改造推广影响因素研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(1): 84-92.

[6] 王文龙, 崔佳琦, 米靖. 基于集成 DEMATEL-ISM 的体育赛事新媒体版权开发影响因素研究[J]. 成都体育学院学报, 2022, 48(2): 131-137.

[7] 岳仁田, 韩亚雄. 航空公司安全风险因素分析的 DEMATEL-ISM 模型研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(6): 2091-2097.

[8] 周炜, 赵挺生, 徐树铭. 基于 DEMATEL 和 ISM 的建筑工程工人安全行为影响因素建模[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(6): 126-132.

[9] 申霞, 夏越, 杨校毅. 集成 DEMATEL/ISM 的煤矿工人违章行为影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(9): 145-151.

[10] 曹艺腾, 王艳华. 基于 DEMATEL-ISM 模型的鲜食玉米产业发展制约因素分析[J]. 玉米科学, 2022, 30(1): 182-190.

[11] 马永霞, 窦亚飞. 以能力培养为导向的高校创业教育生态系统的要素与构建策略: 基于 DEMATEL-ISM 方法的实证分析[J]. 教育发展研究, 2022, 42(1): 68-76.

[12] 李鸿盛, 陈敏, 杨益波. 低热大体积混凝土微应变特性分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(22): 9746-9752.

[13] 王涛, 李北星, 刘敬. 超缓凝大体积混凝土配合比优化及温控技术[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(6): 2154-2161.

[14] 陈冠希, 郭永成. 泵送混凝土关键技术工程实践与应用分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 2377-2380.

[15] 雷拓, 刘宜, 董军锋. 高层混凝土剪力墙置换加固与施工监测[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(27): 11295-11301.

Risk Factors of Pumping Concrete Pipe Plugging Accident Based on DEMATEL-ISM

KANG Zhen¹, XIE Hongtao¹, CHANG Kai²

(1. Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China;
2. Railway Construction Research Institute, China Academy of Railway Sciences Group Co., LTD., Beijing 100081, China)

Abstract: As the key link of high-rise building construction, the factors that affect pumping concrete quality are complex. The risk factors of pumping concrete pipe blocking accident are taken as the research object, and the DEMATEL-ISM model is constructed to clarify the key factors affecting the risk of pumping concrete pipe blocking accident and the hierarchical structure and action mechanism of each factor. The results show that the 22 influencing factors of pumping concrete plugging accident risk can be divided into four levels, in which the rationality of concrete mix ratio is the most core and fundamental factor affecting the risk of pumping concrete plugging accident, and has the greatest influence on other factors. Concrete construction fluidity, output pressure stability and pipeline smoothness have the most direct effect on the risk of pipe blocking accident.

Keywords: pumped concrete; pipe blocking accident risk; DEMATEL-ISM; hierarchy