

# 影响边坡排水系统质量安全因素的 相对重要度分析

李士宣

(济宁市建筑工程质量监督检验测试中心有限公司, 山东 济宁 272000)

**摘要:** 为了对边坡排水系统的质量安全进行评价,以现浇钢筋混凝土排水沟为研究对象,选择了表观质量和强度质量作为一级指标,淤堵状况、最大裂缝开展宽度、变形量、侵蚀度、配筋数量和强度作为二级指标,采用粗糙集和条件熵相结合的方式,并结合现场技术检测数据完成指标分级与决策表构建,对各二级指标的相对重要度作出评价。结果表明,侵蚀度、淤堵状况是影响边坡排水系统质量安全的重要因素,为边坡排水系统的重点监测与维护提供了依据。

**关键词:** 边坡排水系统;质量安全;粗糙集+条件熵;相对重要度

中图分类号: TD74

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0297-04

## Analysis on Relative Importance of Factors Affecting Quality and Safety of Slope Drainage Systems

LI Shixuan

(Jining City Construction Engineering Quality Supervision, Inspection and Testing Center Co., Ltd., Jining 272000, China)

**Abstract:** To evaluate the quality and safety of slope drainage systems, taking cast-in-place reinforced concrete drainage ditches as the research object, the apparent quality and strength quality are chosen as primary indicators, while the siltation status, the maximum crack width, deformation, erosion degree, reinforcement quantity, and strength are selected as secondary indicators. By combining rough set and conditional entropy, and incorporating on-site technical inspection data, the indicator grading and decision tables are constructed to evaluate the relative importance of each secondary indicator. The results indicate that erosion degree and siltation status are the important factors affecting the quality and safety of slope drainage systems, providing a basis for key monitoring and maintenance of slope drainage systems.

**Keywords:** slope drainage system; quality and safety; rough set + conditional entropy; relative importance degree

## 0 引言

边坡工程广泛存在于道路建设、水利枢纽及建筑基坑等工程领域,其稳定性直接关系到工程建设的安全推进和后期运营的整体效益<sup>[1]</sup>。排水系统是边坡工程的核心防护设施之一,其作用在于及时排除边坡内部的地下水和地表汇水,降低孔隙水压力、减小岩土体饱和度,从而有效抑制边坡滑塌、失稳等地质灾害的发生<sup>[2-3]</sup>。现浇钢筋混凝土排水沟因结构整体性好、承载能力强、适用范围广,成为边坡排水系统中最常用的结构形式,其质量安全水平直接决定了边坡排水的效率和可靠性。

近年来,随着我国工程建设向复杂地质区域延伸,边坡排水系统面临的工作环境愈发恶劣,酸碱侵蚀、泥沙淤堵、结构变形等问题频发<sup>[4-5]</sup>,导致排水功能失效进而引发边坡失稳的事故屡有发生,造成了严重的经济损失和人员伤亡。因此,科学识别影响边坡排水系统质量安全的关键因素,明确各因素的相对重要度,成为边坡工程维护和管理的核心问题<sup>[6]</sup>。目前,国内外学者对边坡排水系统的研究多集中于结构设计优化、施工工艺改进等方面<sup>[7-8]</sup>,对质量安全影响因素的定量化评价研究相对不足,传统的专家打分法存在主观性强、权重分配不合理等问题,难以精准反映各因素的实际影响程度。

对于一些不够精确的信息,粗糙集理论能够在无需先验知识的情况下进行属性约简和权重计算<sup>[9-10]</sup>;条件熵则可通过量化属性自身的信息承载

收稿日期: 2026-03-03

作者简介: 李士宣(1993—),男,硕士,工程师,从事工程检测工作。

量,弥补粗糙集在单一属性重要性表征上的不足<sup>[9]</sup>。基于此,本文以现浇钢筋混凝土排水沟为研究对象,构建边坡排水系统质量安全评价指标体系,将粗糙集与条件熵相结合,对各影响因素的相对重要度进行量化分析,旨在识别关键影响因素,为边坡排水系统的定期检测、维护加固提供科学的理论依据和实践指导,提升边坡工程的整体稳定性和安全运营水平。针对钢筋混凝土结构在复杂环境下的劣化问题<sup>[11-12]</sup>,本研究也将为排水结构的防侵蚀、抗冲刷优化提供参考<sup>[13]</sup>。

1 研究方法

粗糙集在影响因素评价中无需依赖主观假设,在多因素分析、指标筛选与权重确定上兼具客观性、简洁性与实用性。河北工业大学李士宣<sup>[14]</sup>曾借助粗糙集理论评价高速公路路域生态效率影响因素。首先建立决策表 $S=(U,Z,D,V)$ 。其中, $U$ 为论域, $Z$ 为条件属性的集合, $D$ 为决策属性的集合, $V$ 表示属性值集合。

用 $Z_i$ 表示条件属性 $Z$ 的子集,则 $Z_i$ 的相对重要度:

$$\text{sig}(Z_i)=\gamma_c(D)-\gamma_{c-\{Z_i\}}(D)=\frac{\left|POS_c(D)\right|-\left|POS_{c-\{Z_i\}}(D)\right|}{|U|} \tag{1}$$

式中: $POS_c(D)$ 为属性对应的正域。

为了使条件属性 $Z_i$ 在系统中表现出自身的重要性,利用条件熵实现决策属性 $D$ 相对于条件属性 $Z$ 的计算:

$$I(Z/D)=\sum_{i=1}^m\frac{\left|Z_i\right|^2}{\left|U\right|^2}\sum_{j=1}^n\frac{\left|D_j\cap Z_i\right|}{Z_i}\left(1-\frac{\left|D_j\cap Z_i\right|}{Z_i}\right) \tag{2}$$

最终得到条件属性 $Z_i$ 的权重:

$$w_1=\frac{\text{sig}(Z_1,C_1,D)+I(D/C_1)}{\sum_{i=1}^n\text{sig}(Z_i,C_1,D)+I(D/Z_i)} \tag{3}$$

2 评价指标体系建立和权重分析

2.1 评价指标体系建立

以现浇钢筋混凝土排水沟为研究对象,选择表面质量、强度质量作为一级指标,淤堵状况、最大裂缝开展宽度、变形量、侵蚀度、配筋数量和强度作为二级指标,如图1所示。

2.2 权重分析

对某边坡现浇钢筋混凝土排水沟进行技术检

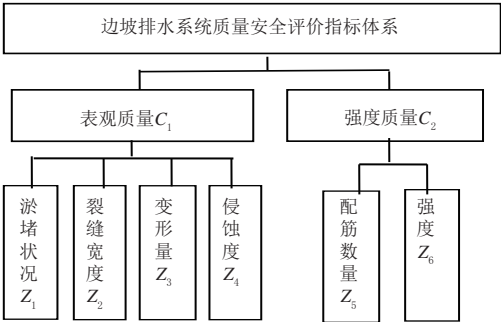


图1 指标划分

测。依据检测结果,判定条件属性 $Z_i$ 的得分,将得分状况 $[100,90)$ 、 $[90,80)$ 、 $[80,70)$ 、 $[70,60)$ 、 $[60,0]$ 分别对应为 $\{V,IV,III,II,I\}$ 5个等级,取其平均值表示决策属性 $\{D\}$ 的等级,计算结果如表1所示。

表1 评价指标决策表

| 论域       | 条件属性  |       |       |       |       |       | 决策属性 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|          | $C_1$ |       |       |       | $C_2$ |       |      |
|          | $Z_1$ | $Z_2$ | $Z_3$ | $Z_4$ | $Z_5$ | $Z_6$ |      |
| $U_1$    | Ⅳ     | Ⅲ     | Ⅴ     | Ⅲ     | Ⅴ     | Ⅳ     | Ⅳ    |
| $U_2$    | Ⅳ     | Ⅳ     | Ⅳ     | Ⅲ     | Ⅴ     | Ⅴ     | Ⅳ    |
| $U_3$    | Ⅲ     | Ⅳ     | Ⅳ     | Ⅳ     | Ⅴ     | Ⅳ     | Ⅳ    |
| $U_4$    | Ⅳ     | Ⅲ     | Ⅴ     | Ⅱ     | Ⅴ     | Ⅴ     | Ⅳ    |
| $U_5$    | Ⅴ     | Ⅲ     | Ⅴ     | Ⅲ     | Ⅴ     | Ⅴ     | Ⅴ    |
| $U_6$    | Ⅲ     | Ⅲ     | Ⅴ     | Ⅲ     | Ⅴ     | Ⅴ     | Ⅳ    |
| $U_7$    | Ⅴ     | Ⅴ     | Ⅳ     | Ⅳ     | Ⅴ     | Ⅳ     | Ⅴ    |
| $U_8$    | Ⅲ     | Ⅴ     | Ⅴ     | Ⅳ     | Ⅴ     | Ⅴ     | Ⅴ    |
| $U_9$    | Ⅲ     | Ⅲ     | Ⅳ     | Ⅲ     | Ⅴ     | Ⅴ     | Ⅳ    |
| $U_{10}$ | Ⅴ     | Ⅲ     | Ⅴ     | Ⅴ     | Ⅴ     | Ⅴ     | Ⅴ    |

将表1根据一级指标分块提取得到表2。

表2 一级指标对应下的分块决策表

| 论域       | 条件属性 $C_1$ |       |       |       | 决策属性 |
|----------|------------|-------|-------|-------|------|
|          | $Z_1$      | $Z_2$ | $Z_3$ | $Z_4$ |      |
| $U_1$    | IV         | III   | V     | III   | IV   |
| $U_2$    | IV         | IV    | IV    | III   | IV   |
| $U_3$    | III        | IV    | IV    | IV    | IV   |
| $U_4$    | IV         | III   | V     | II    | III  |
| $U_5$    | V          | III   | V     | III   | IV   |
| $U_6$    | III        | III   | V     | III   | III  |
| $U_7$    | V          | V     | IV    | IV    | V    |
| $U_8$    | III        | V     | V     | IV    | IV   |
| $U_9$    | III        | III   | IV    | III   | III  |
| $U_{10}$ | V          | III   | V     | V     | V    |

依据得分是否相同,分别对决策属性和条件属性进行等价划分:

决策属性全论域:

$$U/IND(D)=$$

$$\{\{U_1,U_2,U_3,U_5,U_8\},\{U_7,U_{10}\},\{U_4,U_6,U_9\}\}$$

条件属性全论域:

$$UIIND(C_1)=\{\{U_1,U_5,U_6\},U_2,U_3,U_4,U_7,U_8,U_9,U_{10}\}$$

逐一剔除条件属性中各指标,确定论域:

$$UIIND(C_1-\{Z_1\})=\{\{U_1,U_5,U_6\},U_2,U_3,U_4,U_7,U_8,U_9,U_{10}\}$$

$$UIIND(C_1-\{Z_2\})=\{U_1,U_2,U_3,U_4,U_5,U_6,U_7,U_8,U_9,U_{10}\}$$

$$UIIND(C_1-\{Z_3\})=\{U_1,U_2,U_3,U_4,U_5,U_6,U_7,U_8,U_9,U_{10}\}$$

$$UIIND(C_1-\{Z_4\})=\{\{U_1,U_4\},U_2,U_3,U_5,U_6,U_7,U_8,U_9,U_{10}\}$$

根据条件属性各论域和决策属性全论域,保留与决策属性论域相同部分,确定条件属性正域:

$$POS_{C_1}(D)=\{U_1,U_2,U_3,U_4,U_5,U_6,U_7,U_8,U_9,U_{10}\}$$

$$POS_{C_1-\{Z_1\}}(D)=\{U_2,U_3,U_4,U_7,U_8,U_9,U_{10}\}$$

$$POS_{C_1-\{Z_2\}}(D)=\{U_1,U_2,U_3,U_4,U_5,U_6,U_7,U_8,U_9,U_{10}\}$$

$$POS_{C_1-\{Z_3\}}(D)=\{U_1,U_2,U_3,U_4,U_5,U_6,U_7,U_8,U_9,U_{10}\}$$

$$POS_{C_1-\{Z_4\}}(D)=\{U_2,U_3,U_5,U_6,U_7,U_8,U_9,U_{10}\}$$

确定相对重要度:

$$|POS_{C_1}(D)|=10, |POS_{C_1-\{Z_1\}}(D)|=7, \text{总论域数}|U|=10。$$

计算指标  $z_1$  的相对重要度为:

$$\text{sig}(Z_1)=\gamma_{C_1}(D)-\gamma_{C_1-\{Z_1\}}(D)=$$

$$\frac{|POS_{C_1}(D)|-|POS_{C_1-\{Z_1\}}(D)|}{|U|}=\frac{10-7}{10}=0.3 \tag{4}$$

同理,分别计算其余指标的相对重要度如下:

$$\text{sig}(Z_2)=\gamma_{C_1}(D)-\gamma_{C_1-\{Z_2\}}(D)=$$

$$\frac{|POS_{C_1}(D)|-|POS_{C_1-\{Z_2\}}(D)|}{|U|}=\frac{10-10}{10}=0 \tag{5}$$

$$\text{sig}(Z_3)=\gamma_{C_1}(D)-\gamma_{C_1-\{Z_3\}}(D)=$$

$$\frac{|POS_{C_1}(D)|-|POS_{C_1-\{Z_3\}}(D)|}{|U|}=\frac{10-10}{10}=0 \tag{6}$$

$$\text{sig}(Z_4)=\gamma_{C_1}(D)-\gamma_{C_1-\{Z_4\}}(D)=$$

$$\frac{|POS_{C_1}(D)|-|POS_{C_1-\{Z_4\}}(D)|}{|U|}=\frac{10-8}{10}=0.2 \tag{7}$$

将计算指标  $z_1$  相对重要度代入权重计算公式(3),计算得到:

$$w_1=\frac{\text{sig}(Z_1,C_1,D)+I(D/C_1)}{\sum_{i=1}^n \text{sig}(Z_i,C_1,D)+I(D/Z_i)}=0.3679 \tag{8}$$

同理可得其余指标权重分别为: $w_2=0.1321, w_3=0.1153, w_4=0.3847$ 。

按照上述方法确定出强度质量对应的二级指标权重: $w_5=0.4791, w_6=0.5209$ 。将二级指标权重与专家打分法得到的一级指标权重相乘,得到组合指标,具体结果如表3所示。

根据权重熵检验权重分配是否合理,若权重熵在(0.5,1)范围内,则可说明权重大小分配合理,检验公式如式(9)所示。

表3 指标权重分配表

| 评价指标 | 表观质量   | 强度质量   | 组合权重   | 排序 |
|------|--------|--------|--------|----|
|      | $C_1$  | $C_2$  |        |    |
|      | 0.7921 | 0.2079 |        |    |
| 淤堵状况 | 0.3679 |        | 0.2914 | 2  |
| 裂缝宽度 | 0.1321 |        | 0.1046 | 4  |
| 变形量  | 0.1153 |        | 0.0913 | 6  |
| 侵蚀度  | 0.3847 |        | 0.3047 | 1  |
| 配筋数量 |        | 0.4791 | 0.0997 | 5  |
| 强度   |        | 0.5209 | 0.1083 | 3  |

$$H=-\sum_{i=1}^n w_i \log_n w_i \tag{9}$$

将组合权重代入公式(9),计算得到  $H=0.9190$ ,所以权重计算合理。

通过以上分析可以看出,在边坡排水系统中,侵蚀度和淤堵状况对其质量安全的影响分别占据了第一、第二位;对于混凝土结构,随着侵蚀度的增加,其强度也会有下降的趋势。

3 结 语

(1)针对现浇钢筋混凝土排水沟型边坡排水系统,构建了以表观质量、强度质量为一级指标,淤堵状况、最大裂缝开展宽度、变形量、侵蚀度、配筋数量及结构强度为二级指标的质量安全评价指标体系,结合现场技术检测数据完成指标分级与决策表构建,所建体系可全面、客观地反映边坡排水系统的质量安全核心特征,为同类排水系统的质量评价提供了标准化的指标参考框架。

(2)提出粗糙集与条件熵耦合的权重计算方法,弥补了单一粗糙集理论无法表征属性自身信息重要性的缺陷,实现了边坡排水系统各二级评价指标相对重要度的量化测算;经权重熵检验,计算结果满足合理性判定标准( $H=0.9190$ ),验证了该方法在边坡排水系统质量安全评价中的适用性与可靠性,为岩土工程领域同类设施的质量评价提供了科学、客观的方法支撑。

(3)明确了边坡排水系统质量安全的关键影响因素,二级指标组合权重排序结果显示,侵蚀度(0.3047)、淤堵状况(0.2914)为首要影响因素,结构强度、最大裂缝开展宽度次之,变形量、配筋数量为

次要影响因素;其中混凝土结构侵蚀度与强度呈显著负相关,印证了复杂服役环境下混凝土劣化对排水系统结构安全的直接影响。

(4)基于指标相对重要度分析结果,提出边坡排水系统质量安全维护的针对性技术策略:优先将侵蚀度、淤堵状况纳入重点监测与维护范畴,对现浇钢筋混凝土排水结构采取针对性抗侵蚀防护措施,建立常态化淤堵巡检与清理机制;同时兼顾结构裂缝、变形、配筋及强度的定期检测与养护,形成“重点管控+全面防护”的全周期维护体系,可有效提升边坡排水系统的结构耐久性与排水功能稳定性,为边坡工程整体防失稳、防灾害提供核心保障。

#### 参考文献:

- [1] 孙希涛.高陡边坡生态防护技术研究[D].天津:河北工业大学,2019.
- [2] 邓珂,黄江华,张小东,等.降雨条件下边坡防排水设计及稳定性分析[J].地下水,2025,47(6):150-153.
- [3] 钱雨,王利,舒宝,等.考虑孔隙水压力的滑坡位移预测方法研究[J].

中国地质灾害与防治学报,2025,36(5):56-63.

- [4] 万利,吴涛,宋京,等.山岭隧道排水沟泥沙淤积机制及影响因素[J].公路交通科技,2026,43(1):220-230.
- [5] 郑秦山,张渊博.红层泥岩地区边坡排水设施灾害与施工技术[J].中国公路,2025(19):107-109.
- [6] 李岩琛.路基高边坡稳定性的影响因素及控制措施[J].交通世界,2024(17):68-70.
- [7] 陈观友.路堑高边坡工程加固方案优化及稳固性评估[J].工程技术研究,2025,10(24):38-40.
- [8] 潘丹,张金,程晶,等.山区高速公路路堑边沟排水设施设计方法研究[J].公路工程,2023,48(4):105-112.
- [9] 乔建刚,刘翔,耿斌斌.基于粗糙集最优解山区公路边坡防护效果评价[J].北京工业大学学报,2024,50(7):854-863.
- [10] 汤家保.基于粗糙集理论的不完备数据特征选择研究[D].扬州:扬州大学,2025.
- [11] 马智聪,梅波,苏丽,等.亚热带海洋全浸泡环境下钢筋混凝土劣化规律研究[J].矿业科学学报,2024,9(3):381-392.
- [12] 薛茹,陈雨薇,赵雯桐,等.钢筋混凝土结构钢筋锈蚀力学性能研究综述[J].混凝土,2024(12):224-228.
- [13] 陈丰钰,赵永志.钢筋混凝土雨水管道抗冲刷性能优化研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(6):288-291.
- [14] 李士宣.高速公路路域生态效率评价及生态修复体系研究[D].天津:河北工业大学,2020.

(上接第285页)

代完善,不断提升标准的创新性、科学性与工程适用性。

#### 参考文献:

- [1] 上海市水务局.上海市滩涂资源报告(2023年)[R].上海:上海市水务局,2024.
- [2] 崔冬,季永兴,邹丹,等.《上海市海塘安全鉴定规程》编制解析[J].水利技术监督,2020(4):1-4;175.
- [3] 史妍,崔冬,施晓文.上海市主海塘设防标准的适宜性评估[J].水利规划与设计,2026(1):30-33.
- [4] 施震余,张志杰,舒叶华.上海常见保滩类型及其适用性浅析[J].浙江水利水电学院学报,2020,32(2):18-22;27.

- [5] 才多,季永兴,张恒.长江口滩涂种青效果影响因素分析[J].人民长江,2023,54(3):78-82.
- [6] 才多.长江口崇明北沿海堤生态化建设试验研究[J].水利技术监督,2022(10):214-217.
- [7] 李竹,印越,姜玉山.海洋生态修复技术在杭州湾湿地的应用[J].水利技术监督,2025(10):288-291.
- [8] 崔冬,刘新成,俞相成.潮汐河口大型中低滩促淤工程内部布局研究[J].水利水运工程学报,2012(2):27-33.
- [9] 上海市滩涂生态发展有限公司.上海横沙东滩整治研究与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2022.
- [10] 崔冬,宋永港,刘新成,等.淤泥质潮汐河口促淤工程淤积效果预报方法:中国,ZL 2018 1 0725030.7[P].2018-11-27..