

# 基于 $N-K$ 模型的土石坝渗流安全风险耦合

王宜港,王日升\*,赵瑜隆,陈其帆,王晓铭,蒋雪妮

山东交通学院 交通土建工程学院,山东 济南 250357

**摘要:**为提高土石坝的安全性,分析土石坝渗流安全风险源,基于  $N-K$  模型,将人为因素、材料因素、环境因素、管理因素等4个土石坝渗流安全风险影响因素按照不同耦合方式划分为单因素风险耦合、双因素风险耦合和多因素风险耦合等3种安全风险耦合类型,并结合具体案例计算相应的安全风险耦合值,得到不同安全风险耦合方式对土石坝渗流安全的影响程度,并提出针对性建议,以期降低土石坝渗流安全风险发生的概率。

**关键词:**渗流安全风险源; $N-K$ 模型;耦合方式;风险耦合

**中图分类号:**TV641

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2022)03-0131-06

**引用格式:**王宜港,王日升,赵瑜隆,等.基于  $N-K$  模型的土石坝渗流安全风险耦合[J].山东交通学院学报,2022,30(3):131-136.

WANG Yigang, WANG Risheng, ZHAO Yulong, et al. Seepage safety risk coupling of earth rock dam based on  $N-K$  model[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(3): 131-136.

## 0 引言

据统计数据表明,在所有堤坝种类中,土石坝往往最容易发生溃坏,其中,渗流是土石坝溃坏的主要原因<sup>[1-2]</sup>。研究人员采用多种方法分析土石坝渗流安全风险:何亚辉<sup>[3]</sup>采用云模型和模糊层次分析法对土石坝渗流风险进行安全评价;唐斌斌等<sup>[4]</sup>提出组合赋权-云模型评价方法,评价预测土石坝的渗流安全风险情况;黄镇中<sup>[5]</sup>采用逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)评价方法,在组合赋权的基础上进行预测评价,得到土石坝渗流安全风险等级。但对土石坝渗流安全风险各影响因素的耦合研究较少<sup>[6-8]</sup>。

在安全领域基于  $N-K$  模型的研究应用较广泛。罗帆等<sup>[9]</sup>采用  $N-K$  模型计算不同安全风险耦合发生的概率及风险值,为空管安全风险的管理提供了新方法。吴贤国等<sup>[10]</sup>通过计算发现,在建筑施工安全风险管理中多风险耦合增大事故发生的概率,且主观因素影响较大。潘和平等<sup>[11]</sup>研究发现主观因素与环境因素耦合比其他形式更易引发地铁施工安全事故。许慧等<sup>[12]</sup>分析国内外相关事故案例,结合  $N-K$  模型得到各个安全风险耦合方式对城市轨道交通运营的影响程度。王焕新等<sup>[13]</sup>分析发现多因素耦合增加海上交通事故发生的概率。

本文基于  $N-K$  模型,对影响土石坝渗流安全风险的各因素进行相关耦合分析研究,探讨不同耦合方式对土石坝渗流安全的影响程度,并提出相应措施,以期降低土石坝渗流安全风险发生的概率,增强对土石坝渗流安全风险的管控能力。

**收稿日期:**2021-11-22

**基金项目:**山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE274);山东省重点研发计划(软科学)项目(2020RKB01602);山东省交通运输厅科技计划(2019B63, 2020B93)

**第一作者简介:**王宜港(1997—),男,山东汶上人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:3296912763@qq.com。

\* **通信作者简介:**王日升(1979—),男,山东招远人,副教授,工学博士,硕士研究生导师,主要研究方向为水工建筑物健康诊断及 BIM 技术应用,E-mail:wangrsh2004@163.com。

## 1 理论与方法

### 1.1 风险影响因素

研究人员普遍认为引发土石坝渗流安全风险主要有人为因素、材料因素、环境因素和管理因素4个方面,但各因素对土石坝渗流安全风险方面的影响程度不同<sup>[14-16]</sup>。

1) 人为因素。经常被忽略,是最可能引发土石坝渗流风险的原因,主要体现在施工及后期养护中,包括施工工艺、安全意识、检测操作等人员不安全行为易发方面。

2) 材料因素。材料因素是引发土石坝渗流风险的主要原因,主要体现在坝基及坝体的材料特性等方面,比如土料颗粒级配、坝基强度、透水性、压实度、干密度、压缩量等相关性能指标。

3) 环境因素。也可称为外界因素,主要包括自然灾害、地质活动等方面的影响,比如上部压力、水头差、外加荷载等,也包括降雨、洪水、地震及地壳运动等方面。

4) 管理因素。是可能引发土石坝渗流风险的最薄弱环节,也是最重要的环节,主要体现在管理水平及相关规章制度的落实程度等方面,比如加固措施的选择、汛情的掌握及预警管理、调度方案等。

### 1.2 N-K 模型简介

$N-K$ 模型最开始用于研究生物学中的基因系统,演化成为某一系统内各因素间相互作用并对该系统整体产生影响的结构化仿真研究模型,其最大优势是可以相对简单地处理一些无法使用实际数据进行研究的问题。 $N-K$ 模型包含 $N$ 和 $K$ 2个参数, $N$ 为系统内影响因素的个数, $K$ 为系统内各影响因素间相互作用的次数, $K=0,1,2,\dots,N-1$ 。

通常采用风险耦合信息交互公式进行具体分析,结合土石坝渗流安全风险源,计算公式为

$$T(a,b,c,d) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K P_{hijk} \text{lb} \left[ \frac{P_{hijk}}{P_{h\dots} \times P_{\dots i\dots} \times P_{\dots j\dots} \times P_{\dots k\dots}} \right], \quad (1)$$

式中: $a,b,c,d$ 分别为人为、材料、环境、管理等4种不同影响因素; $h,i,j,k$ 分别为4种影响因素所处的状态; $P_{hijk}$ 为4种因素耦合发生的概率; $P_{h\dots}$ 、 $P_{\dots i\dots}$ 、 $P_{\dots j\dots}$ 、 $P_{\dots k\dots}$ 分别为单独考虑人为因素处于 $h$ 状态时、材料因素处于 $i$ 状态时、环境因素处于 $j$ 状态时、管理因素处于 $k$ 状态时安全风险发生的概率。

### 1.3 风险耦合及其分类

风险耦合一般指在风险系统活动复杂的过程中,不同风险或风险因子间的相互依赖及相互影响的关系与程度。基于耦合风险,将 $N-K$ 模型与影响土石坝渗流安全风险的4个因素相结合,计算风险耦合,量化渗流安全风险发生的概率,即通过某耦合方式计算得到的耦合值越大,该耦合方式引起的安全风险发生的概率越大,反之,通过某耦合方式计算得到的耦合值越小,该耦合方式引起的安全风险发生的概率越小。

本文依据不同的耦合方式将土石坝渗流安全风险因素分为单因素风险耦合、双因素风险耦合及多因素风险耦合等3种类型。其中,单因素风险耦合可视为双因素风险耦合的特例,可理解为其内部风险因子发生耦合。

#### 1.3.1 单因素风险耦合

单因素风险耦合是指土石坝渗流安全风险仅有某单一影响因素作用,特指其内部因子相互影响、作用引起的方式。本文中的单因素风险耦合包括人为、材料、环境、管理等影响因素构成的4种耦合方式,分别记为 $T_{11}(a)$ 、 $T_{12}(b)$ 、 $T_{13}(c)$ 、 $T_{14}(d)$ 。

#### 1.3.2 双因素风险耦合

双因素风险耦合是指在各耦合因素中,存在两两作用发生风险耦合的方式。本文中的双因素风险耦合包括人为-材料、人为-环境、人为-管理、材料-环境、材料-管理、环境-管理等6种耦合方式,分别记为 $T_{21}(a,b)$ 、 $T_{22}(a,c)$ 、 $T_{23}(a,d)$ 、 $T_{24}(b,c)$ 、 $T_{25}(b,d)$ 、 $T_{26}(c,d)$ 。以 $T_{21}(a,b)$ 为例,人为-材料耦合方式的风险耦合值

$$T_{21}(a, b) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I P_{hi..} \cdot \text{lb} \left[ \frac{P_{hi..}}{P_{h...} \times P_{i..}} \right], \quad (2)$$

式中:  $P_{hi..}$  为人为因素处于  $h$  状态,材料因素处于  $i$  状态时安全风险发生的概率。

### 1.3.3 多因素风险耦合

多因素风险耦合是指土石坝渗流安全风险影响因素中含有 3 种及 3 种以上因素相互作用的方式。本文多因素风险耦合包括人为-材料-环境、人为-材料-管理、人为-环境-管理、材料-环境-管理、人为-材料-环境-管理等 5 种耦合方式,分别记为  $T_{31}(a, b, c)$ 、 $T_{32}(a, b, d)$ 、 $T_{33}(a, c, d)$ 、 $T_{34}(b, c, d)$ 、 $T_4(a, b, c, d)$ 。以  $T_{31}(a, b, c)$  为例,人为-材料-环境耦合方式的风险耦合值

$$T_{31}(a, b, c) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{hij.} \cdot \text{lb} \left[ \frac{P_{hij.}}{P_{h...} \times P_{i..} \times P_{.j.}} \right], \quad (3)$$

式中:  $P_{hij.}$  为人为因素处于  $h$  状态,材料因素处于  $i$  状态,环境因素处于  $j$  状态时安全风险发生的概率。

## 2 土石坝渗流安全实例分析

### 2.1 数据统计

根据文献研究及 72 座土石坝案例具体分析,可知土石坝中不同程度地存在渗流安全风险。采用 0 或 1 分别表示影响土石坝渗流安全风险的 4 个因素的耦合情况,0 为该耦合方式下某一影响因素未发挥作用,1 为该耦合方式下某一影响因素发挥作用,分别统计单因素风险耦合、双因素风险耦合、多因素风险耦合造成土石坝渗流安全风险的次数及概率,结果如表 1 所示。

表 1 各耦合方式下引发土石坝渗流安全风险的次数及频率

单因素风险耦合			双因素风险耦合			多因素风险耦合		
耦合方式	次数	频率	耦合方式	次数	频率	耦合方式	次数	频率
0000	0	0	1100	2	0.027 8	1110	9	0.125 0
1000	1	0.013 9	1010	3	0.041 7	1101	5	0.069 4
0100	2	0.027 8	1001	1	0.013 9	1011	4	0.055 6
0010	2	0.027 8	0110	8	0.111 0	0111	14	0.194 5
0001	1	0.013 9	0101	5	0.069 4	1111	10	0.138 9
			0011	5	0.069 4			

由表 1 可知,双因素风险耦合及多因素风险耦合造成土石坝渗流安全风险发生的次数和频率均比单因素风险耦合大。

### 2.2 各耦合方式的耦合值

1)在单因素风险耦合中,以耦合方式 1...发生的概率  $P_{1...}$  为例,表示仅考虑人为因素作用造成土石坝渗流安全风险发生的概率,即

$$P_{1...} = P_{1000} + P_{1100} + P_{1010} + P_{1001} + P_{1110} + P_{1101} + P_{1011} + P_{1111} = 0.486 2。 \quad (4)$$

同理,单因素风险耦合中的其他耦合方式可根据式(4)计算其发生的概率,结果如表 2 所示。

表 2 单因素耦合中各耦合方式发生的概率

$P_{0...}$	$P_{1...}$	$P_{.0..}$	$P_{.1..}$	$P_{..0.}$	$P_{..1.}$	$P_{...0}$	$P_{...1}$
0.513 8	0.486 2	0.236 2	0.763 8	0.236 1	0.763 9	0.375 0	0.625 0

2)在双因素风险耦合中,以  $P_{11..}$  为例,表示人为、材料因素参与耦合造成安全风险发生的概率,即

$$P_{11..} = P_{1100} + P_{1110} + P_{1101} + P_{1111} = 0.3611。 \quad (5)$$

同理,双因素风险耦合中的其他耦合方式可根据式(5)计算安全风险发生的概率,结果如表3所示。

表3 双因素风险耦合中各耦合方式发生的概率

$P_{00..}$	$P_{01..}$	$P_{10..}$	$P_{11..}$	$P_{0-0}$	$P_{0-1}$	$P_{1-0}$	$P_{1-1}$
0.1111	0.4027	0.1251	0.3611	0.1111	0.4027	0.1250	0.3612
$P_{0-0}$	$P_{0-1}$	$P_{1-0}$	$P_{1-1}$	$P_{..00}$	$P_{..01}$	$P_{..10}$	$P_{..11}$
0.1666	0.3472	0.2084	0.2778	0.0417	0.1945	0.1944	0.5694
$P_{-0-0}$	$P_{-0-1}$	$P_{-1-0}$	$P_{-1-1}$	$P_{-..00}$	$P_{-..01}$	$P_{-..10}$	$P_{-..11}$
0.0834	0.1528	0.2916	0.4722	0.0695	0.1666	0.3055	0.4584

3)在多因素风险耦合中,以 $P_{111.}$ 为例,其含义为人为、材料、环境因素参与耦合导致安全风险发生的概率,即

$$P_{111.} = P_{1110} + P_{1111} = 0.2639。 \quad (6)$$

同理,多因素风险耦合中的其他耦合方式可根据式(6)计算安全风险发生的概率,结果如表4所示。

表4 多因素风险耦合下各耦合方式发生的概率

$P_{000.}$	$P_{100.}$	$P_{010.}$	$P_{001.}$	$P_{110.}$	$P_{101.}$	$P_{011.}$	$P_{111.}$
0.0139	0.0278	0.0972	0.0972	0.0972	0.0973	0.3055	0.2639
$P_{-000}$	$P_{-100}$	$P_{-010}$	$P_{-001}$	$P_{-110}$	$P_{-101}$	$P_{-011}$	$P_{-111}$
0.0139	0.0556	0.0695	0.0278	0.2360	0.1388	0.1250	0.3334
$P_{0-00}$	$P_{1-00}$	$P_{0-10}$	$P_{0-01}$	$P_{1-10}$	$P_{1-01}$	$P_{0-11}$	$P_{1-11}$
0.0278	0.0417	0.1388	0.0833	0.1667	0.0833	0.2639	0.1945
$P_{00-0}$	$P_{10-0}$	$P_{01-0}$	$P_{00-1}$	$P_{11-0}$	$P_{10-1}$	$P_{01-1}$	$P_{11-1}$
0.0278	0.0556	0.1388	0.0833	0.1528	0.0695	0.2639	0.2083

根据式(1)~(6)及表1~4可得各耦合方式下的风险耦合值,如表5所示。

表5 各耦合方式下的风险耦合值

耦合方式	$T_{21}(a,b)$	$T_{22}(a,c)$	$T_{23}(a,d)$	$T_{24}(b,c)$	$T_{25}(b,d)$	$T_{26}(c,d)$
风险耦合值	0.0016	0.0031	0.0033	0.0162	0.0050	0.0063
耦合方式	$T_{31}(a,b,c)$	$T_{32}(a,b,d)$	$T_{33}(a,c,d)$	$T_{34}(b,c,d)$	$T_4(a,b,c,d)$	
风险耦合值	0.0096	0.0129	0.0172	0.0127	0.0255	

由表5可知,按照风险耦合值从大到小的顺序排列,各耦合方式依次为 $T_4$ 、 $T_{33}$ 、 $T_{24}$ 、 $T_{32}$ 、 $T_{34}$ 、 $T_{31}$ 、 $T_{26}$ 、 $T_{25}$ 、 $T_{23}$ 、 $T_{22}$ 、 $T_{21}$ 。

随耦合因素的增多,风险耦合值越来越大,即土石坝渗流安全风险发生的概率明显增大。3因素风险耦合方式的风险耦合值远小于4因素风险耦合方式,双因素风险耦合方式的风险耦合值比3因素风险耦合方式小。

3因素风险耦合的各耦合方式中,人为-环境-管理因素的风险耦合值比人为-材料-环境、人为-材料-管理、材料-环境-管理等大。因此,在管控土石坝渗流安全风险时要重视人为、管理等相对可控的影响因素。土石坝的日常管理和养护需重视人为因素与其他因素的耦合作用,多注意轻微病害防治、坝面防护及加固、防汛管理等,进一步完善相关的管理制度,落实责任到岗,责任到人,尽可能避免出现多因素

风险耦合的情况,特别是4因素风险耦合情况。

在双因素风险耦合的各耦合方式中,材料-环境因素的风险耦合值明显比人为-材料、人为-环境、人为-管理、材料-管理、环境-管理等大。因此,材料因素和环境因素分别作为土石坝渗流安全风险源的内部因素和外界因素,在安全风险控制中占主导地位<sup>[17]</sup>。修筑坝体应选择长期稳定、与工程性质匹配的土石材料:防渗材料应保持塑性和渗透稳定性,其渗透系数、有机质含量等指标应符合相关标准;外部材料力学性能较好,排水性良好;排水材料、反滤材料及过渡层材料应确保致密性、级配、透水性、抗风化性能的良好程度等。环境因素的影响源多为自然灾害等不可抗因素,仅以地震为例,可提高坝顶石料的粒径,增加坝顶宽度,采用可放缓坝坡、土工格栅加筋、改性石料、干砌石护坡等措施。

### 3 结论

1)分析有关土石坝渗流安全的案例,基于  $N-K$  模型对土石坝渗流安全风险及其影响因素进行耦合分析,分别计算单因素风险耦合、双因素风险耦合、3因素风险耦合中各耦合方式的风险耦合值。

2)在双因素风险耦合方式中,材料-环境因素组合的风险耦合值最大,两者分别作为影响土石坝渗流风险的内部因素、外界因素,在安全风险控制中占重要地位。

3)多因素共同耦合作用的3因素风险耦合方式中,人为-环境-管理耦合方式的风险耦合值相对较大。在管控安全风险方面,不能忽视相对可控的人为因素、管理因素的影响作用。

目前,对土石坝渗流安全风险影响因素的辨识、概括及案例数据收集、处理尚未展开深入研究,在进一步研究中可全面评估土石坝渗流安全风险影响因素的作用,不断完善土石坝安全评估体系。

#### 参考文献:

- [1]解家毕,孙东亚.全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J].水利水电技术,2009,40(12):124-128.  
XIE Jiabi, SUN Dongya. Statistics of dam failures in China and analysis on failure causations [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(12): 124-128.
- [2]彭雪辉,盛金保,李雷,等.我国水库大坝风险标准制定研究[J].水利水运工程学报,2014(4):7-13.  
PENG Xuehui, SHENG Jinbao, LI Lei, et al. Research on dam risk criteria of China [J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4): 7-13.
- [3]何亚辉.基于云模型和模糊层次分析法的土石坝渗流安全风险评价研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.  
HE Yahui. Study on safety risk assessment of earth rock dam seepage based on cloud model and fuzzy analytic hierarchy process [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [4]唐斌斌,吴枫,夏雪峰,等.基于组合赋权-云模型土石坝渗流安全风险模糊综合评价[J].水利规划与设计,2019(1):119-121.
- [5]黄镇中.基于组合赋权-TOPSIS土石坝渗流安全等级评价[J].江西水利科技,2019,45(1):68-71.  
HUANG Zhenzhong. Assessment of seepage safety grade of earth-rock dams based on combination weighting-TOPSIS [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2019, 45(1): 68-71.
- [6]轩向阳,李露凡,赵志刚.基于ISM的土石坝安全影响因素研究[J].低温建筑技术,2015(7):128-129.
- [7]SELVA J. Long-term multi-risk assessment: statistical treatment of interaction among risks [J]. Natural Hazards, 2013, 67(2): 701-722.
- [8]KAPPES M S, KEILER M, ELVERFELDTK V, et al. Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review [J]. Natural Hazards, 2012, 64(2): 1925-1958.
- [9]罗帆,刘堂卿.基于  $N-K$  模型的空中交通安全耦合风险分析[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2011,33(2):267-270.  
LUO Fan, LIU Tangqing. Analysis of coupled risk of air traffic safety based on  $N-K$  model [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2011, 33(2): 267-270.
- [10]吴贤国,吴克宝,沈梅芳,等.基于  $N-K$  模型的地铁施工安全风险耦合研究[J].中国安全科学学报,2016,26

- (4):96-101.
- WU Xianguo, WU Kebao, SHEN Meifang, et al. Research on coupling of safety risks in metro construction based on  $N-K$  model[J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(4):96-101.
- [11] 潘和平, 凡稳. 基于  $N-K$  模型的建筑施工安全风险耦合研究[J]. *安阳工学院学报*, 2019, 18(4):55-58.
- [12] 许慧, 岳靖川, 杜茂康, 等. 基于  $N-K$  模型的城市轨道交通运营风险耦合研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2020, 23(10):105-108.
- XU Hui, YUE Jingchuan, DU Maokang, et al. Analysis of urban rail transit coupling operation risks based on  $N-K$  model[J]. *Urban Mass Transit*, 2020, 23(10):105-108.
- [13] 王焕新, 刘正江. 基于  $N-K$  模型的海上交通安全风险因素耦合分析[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(1):56-61.
- WANG Huanxin, LIU Zhengjiang. Coupling analysis of the risk factors for the maritime transportation safety based on the  $N-K$  model[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(1):56-61.
- [14] LEVESON N G. Applying systems thinking to analyze and learn from events[J]. *Safety Science*, 2011, 49(1):55-64.
- [15] 薛晔, 刘耀龙, 张涛涛. 耦合灾害风险的形成机理研究[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(2):44-50.
- XUE Ye, LIU Yaolong, ZHANG Taotao. Research on formation mechanism of coupled disaster risk[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(2):44-50.
- [16] 张建云, 杨正华, 蒋金平. 我国水库大坝病险及溃决规律分析[J]. *中国科学(技术科学)*, 2017, 47(12):1313-1320.
- ZHANG Jianyun, YANG Zhenghua, JIANG Jinping. An analysis on laws of reservoir dam defects and breaches in China[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, 47(12):1313-1320.
- [17] 陈松滨, 范穗兴, 韩小妹. 土石坝工程设计与生态环境[C]//水库大坝高质量建设与绿色发展:中国大坝工程学会2018学术年会论文集.[出版地不详]:中国大坝工程学会, 2018:71-74.

## Seepage safety risk coupling of earth rock dam based on $N-K$ model

WANG Yigang, WANG Risheng<sup>\*</sup>, ZHAO Yulong,  
CHEN Qifan, WANG Xiaoming, JIANG Xueni

*School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China*

**Abstract:** To improve the security of earth and rock fill dam, the earth-rock dam seepage safety risk source is analyzed. Based on  $N-K$  model, the four factors affecting the seepage safety risk of earth-rock dams, including human factors, material factors, environmental factors, and management factors, are divided into three types of safety risk coupling, including single-factor risk coupling, dual-factor risk coupling, and multi-factor risk coupling, according to different coupling methods. Combined with specific cases, the corresponding coupling values of safety risks are calculated. The influence degree of different coupling modes of safety risks on seepage safety of earth-rock dam is obtained, and corresponding suggestions are put forward in order to reduce the probability of seepage safety risks of earth-rock dam.

**Keywords:** seepage safety risk source;  $N-K$  model; coupling mode; risk coupling

(责任编辑:王惠)