

文章编号: 2097-096X(2025)04-0412-15

前期决策阶段土石坝堆石料弹性模量系数快速取值方法

朱方亮^{1,2}, 朱凯斌^{1,2}, 杨正权^{1,2}, 李敬军^{1,2}, 于仲洋^{1,2}, 范 猛^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038;

2. 水利部水工程抗震与应急支持工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 大坝变形分析是土石坝结构分析和安全评价的重要内容。坝料变形特性参数的确定是大坝变形分析的基础。针对在大坝前期决策阶段(规划、预可行性研究和可行性研究阶段初期)多不具备通过试验确定坝料变形特性参数的问题, 基于贝叶斯网络, 提出了坝料变形控制参数 K (弹性模量系数)的快速取值方法, 为前期开展大坝变形分析和安全评价提供了取值范围。主要研究成果和结论为: (1)从地震荷载、坝料物理特性和大坝结构特性三个方面, 确定了8个贝叶斯网络节点, 建立了土石料变形特性网络模型架构; (2)基于建立的土石坝统计数据库, 提出了基于贝叶斯网络的土石料弹性模量系数 K 快速取值方法; (3)通过对西部某土石坝坝壳料弹性模量系数 K 进行取值范围预估, 验证了本文所提出的快速取值方法在实际工程中的适用性。研究成果可为同类型工程前期决策阶段变形安全评价中土石坝坝料弹性模量系数 K 的取值提供参考依据。

关键词: 贝叶斯网络; 土石料; 变形参数估计; 安全评价; 前期决策阶段

中图分类号: TV641

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20250136

1 研究背景

随着我国水电工程建设管理质量要求的提高, 对水电工程前期决策(规划、预可行性研究和可行性研究阶段)、招标设计、施工详图设计、运行维护、退役等全生命周期各阶段的安全评价有了更高的要求。以土石坝工程安全评价为例, 相关规范^[1-4]已从过去的单一稳定安全评价过渡至现行的稳定和变形综合安全评价。前期决策阶段开展变形分析从而进行安全评价对于预估坝料储量和坝型选择具有重要价值。稳定分析因为获取坝料强度特性参数简单, 在规划阶段初期根据现场查勘成果即可给出抗剪强度建议区间进行稳定安全评价^[4]。但变形分析受限于土石料的变形参数获取方法和强非线性变形特性^[5-7], 普遍仅在可行性研究阶段后期进行变形安全评价, 即使对于投资规模大的重要工程, 也只能将变形安全评价延伸至可行性研究阶段初期(以下简称为“可研阶段”)或预可行性研究阶段(以下简称为“预可阶段”)。如何在前期缺乏试验成果的情况下确定变形参数取值范围, 开展土石坝稳定和变形综合安全评价是目前制约土石坝前期决策阶段安全评价发展的重要问题。

贝叶斯网络作为一种条件概率统计方法, 可以有效的表达不确定性概率和事件预期结果^[8], 已被广泛应用于大坝风险分析和评估中。赵邵峰等^[9]基于贝叶斯网络, 建立了随机场与服役年限的映射关系, 研究了坝基防渗体渗透系数、孔隙率和固相钙浓度随机场情况下特高土心墙堆石坝的渗流与溶蚀特征, 并对土心墙堆石坝服役年限进行了可靠性分析。刘彪等^[10]基于贝叶斯网络模型, 利用已有的砂砾石坝挖坑检测小样本级配参数数据来推断构建总体分布, 实时评估大坝填筑施工过程中砂砾石坝料的压实特性。林鹏远等^[11]结合已有中小型水库均质土石坝施工风险因素分析成果, 从“地质条件风

收稿日期: 2025-06-05; 网络首发时间: 2025-06-17

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20250617.1627.001>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2024YFF1700504, 2024YFF1700505); 中国水科院基本科研业务费专项项目(GE0145B052021); 中国水科院科技成果转化基金专项项目(GE121003A0032022, GE121003A0032024)

作者简介: 朱方亮(2000-), 硕士生, 主要从事土动力学与土工结构抗震研究。E-mail: zhufangliang0909@163.com

通信作者: 杨正权(1980-), 博士, 正高级工程师, 主要从事土动力学与土工结构抗震研究。E-mail: yangzhq@iwhr.com

险、设计风险、施工风险、运行环境风险”4个方面总结提炼出24个风险致因指标以及可能引起的13种风险事件确定了贝叶斯网络模型,对大坝渗漏风险进行了分析评估。为了提高对工程岩体地应力级别评估的准确性,段淑倩等^[12]通过收集115组工程实例利用贝叶斯优化方法对相关规范提出的强度应力比判据进行了改进。徐娜等^[13-14]借助贝叶斯网络开展了土石坝工程风险评价研究。综上所述,基于贝叶斯网络对于复杂系统和不确定因素较多的工程资料在统计应用上的优势,可通过建立土石坝统计数据库,构建贝叶斯网络模型架构对坝料变形参数进行统计分析。

坝壳料作为土石坝的主要筑坝材料,其应力变形特性对土石坝的沉降变形起到控制性作用^[15-18]。本文以坝壳料为研究对象,对标现行规范建立基于贝叶斯网络的坝料变形特性网络模型架构,以工程中常用的邓肯-张E-B非线性弹性模型为基础,通过研究模型参数与弹性模量间的关系,选择模型中弹性模量系数 K 作为贝叶斯网络模型架构根节点;通过统计国内实际水电工程土石坝设计资料建立统计数据库,提出弹性模量系数 K 快速估计方法;最后依托西部某实际土石坝工程,对本工程坝壳料弹性模量系数 K 进行前期不同决策阶段的取值范围估计,并验证其在实际工程中的适用性。

2 基于贝叶斯网络的坝料变形特性网络模型架构

2.1 贝叶斯网络原理 贝叶斯网络是一种将不确定性知识与概率推理紧密结合的数学模型^[19-22],其核心在于用图形化方式揭示变量间的复杂关系。这种网络本质上是一个有向无环图,每个节点代表特定变量或事件,既可以是具体观测数据,也可以是抽象概念,每个节点都附带着自身的概率分布特性。节点间的有向连接刻画了变量间的因果关系,这种结构化的表达方式让原本模糊的依赖关系变得直观可视。网络结构中隐含着关键的条件独立性假设,这种特性使得原本需要处理指数级增长的联合概率分布问题,能够被巧妙分解为多个局部条件概率的组合,从而大幅降低计算复杂度。

贝叶斯网络的建模流程首先需要确定解决问题所涉及的关键变量(即网络节点)及其相互关系(通过有向弧连接),从而建立起网络的基本架构。在完成架构设计后,紧接着需要依据物理力学机制,确定各节点的先验概率以及节点之间的条件概率分布。

2.2 前期决策阶段坝料变形特性网络模型架构 《水力发电工程地质勘察规范》(GB 50287—2016)(以下简称“勘察规范”)明确了各设计阶段与大坝相关的勘测工作任务、内容和技术要求。以该规范中明确规定的规划、预可研、可研3个阶段的勘察工作建立各阶段架构,并确定贝叶斯网络模型架构。

根据勘察规范有关规定,规划阶段主要的研究任务是了解规划河流或河段的区域地质、地震概况、工程地质问题和坝址附近的天然建筑材料的赋存情况。可以获取坝址区地震基本烈度和点荷载等简易野外试验确定的岩石强度特征。因此,以“基本烈度”和“简易岩性判别”为此阶段的架构节点。

预可研阶段主要的研究任务是初选代表性坝址、工程地质初步评价、地震安全性评价和初查代表性坝型所需主要天然建筑材料。可以获取不同超越概率水平下的场址地震动参数,坝料饱和单轴抗压强度和预估坝高。因此,以“设防烈度”、“岩性确定”和“预估坝高”为此阶段的架构节点。

可研阶段主要的研究任务是查明坝址区的工程地质条件,对选定坝址各建筑物的工程地质条件、主要工程地质问题进行论证和评价和提供建筑物设计所需的工程地质资料。可以获取特征水位和工程总体布置,并对坝型、坡比和孔隙率等设计要素进行确定。因此,以“坝型”、“坡比”、“孔隙率”和“坝高”为此阶段的架构节点。

综上所述,在前期决策阶段勘察工作主要从地震荷载、坝料物理特性和大坝结构特性三个方面开展技术研究工作。图1给出了坝料变形特性贝叶斯网络模型架构,共包括“基本烈度”、“设

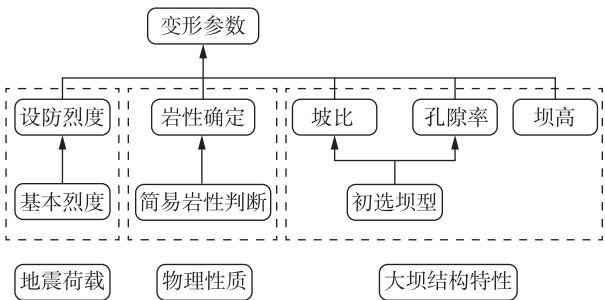


图1 坝料变形特性贝叶斯网络模型架构
Fig. 1 Bayesian network model framework for deformation characteristics of earth-rockfill materials

防烈度”、“简易岩性判别”、“岩性确定”、“初选坝型”、“坡比”、“孔隙率”和“坝高”等8个分析节点，箭头代表前一阶段节点的确定对后一阶段节点有影响，两者间为单向因果关系。

3 基于贝叶斯网络的堆石料弹性模量系数 K 快速取值方法

3.1 坝料弹性模量系数 K 邓肯-张E-B模型自提出以来，因参数物理意义明确被广泛应用于土石坝应力变形分析^[23]。根据大量土的三轴试验，其应力应变关系曲线可以假定为如式(1)所示的双曲线模型

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (1)$$

式中： a 、 b 为试验常数； $\sigma_1 - \sigma_3$ 为主应力差； ε_a 为轴向应变。

在不同应力条件下土的切线弹性模量 E_t 按照式(2)或(3)确定：

$$E_t = K \cdot P_a \left[\frac{\sigma_3}{P_a} \right]^n \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (2)$$

$$E_t = K \cdot P_a \left[\frac{\sigma_3}{P_a} \right]^n [1 - R_f S_l]^2 \quad (3)$$

式中： K 为弹性模量系数； n 为弹性模量指数； c 为黏聚力，kPa； φ 为内摩擦角，°； R_f 为破坏应力比； P_a 为大气压力，101.3 kPa； S_l 为应力水平。

根据统计资料分析^[24-38]，堆石料弹性模量指数 n 一般在0.2~0.5区间、破坏应力比在0.65以上，300 m级大坝的计算围压在3000 kPa以内，主堆石坝料在正常运用条件下的应力水平一般小于0.5。为了研究切线弹性模量和弹性模量系数间的变化规律，对上述使用边界条件内的切线弹性模量 E_t 的变化趋势进行系统分析。表1给出了不同应力水平、弹性模量指数、破坏应力比以及围压条件下的切线弹性模量 E_t 。

分析可知，切线弹性模量 E_t 与弹性模量系数 K 呈现正相关关系；当围压介于200~1000 kPa、弹性模量指数 n 小于0.3时，切线弹性模量 E_t 基本在弹性模量系数 K 的0.61~1.69倍，在特定条件下，切线弹性模量 E_t 与弹性模量系数 K 基本相当。弹性模量系数 K 在一定条件下可基本反映切线弹性模量 E_t 的特征。因此，选择弹性模量系数 K 作为快速估计方法的研究对象。

3.2 土石坝统计数据库及概率分析

3.2.1 土石坝统计数据库 本数据库共统计69个土石坝工程资料。表2给出了部分工程(其余数据见参考文献)对应图1所示的8个分析节点的统计数据。其中，“简易岩性判别”、“岩性确定”和“初选坝型”节点分别对应表格中的岩性、饱和单轴抗压强度和坝型。

3.2.2 节点计算区间 (1)弹性模量系数 K 计算区间。弹性模量系数 K 的计算区间根据图2所示的箱型图进行划分，确定了两个四分位数分别为776.30和1143.00，四分位数取整后将参数区间划分为[340, 780)、[780, 1150)、[1150, 1800)三个区间。

(2)“简易岩性判断”计算区间。规划阶段一般通过点荷载试验对土料的软硬进行初步判别。点荷载强度指标可用于预估与之相关的单轴抗压强度和抗拉强度等指标^[39]。该指标以抗压强度15 MPa为分界，确定该节点区间划分为(0, 15)和[15, ∞)。

(3)“基本烈度”计算区间。规划阶段需按照《中国地震动参数区划图》(GB 18306)^[40]确定地震基本烈度，将该节点划分为“<Ⅵ度”、“Ⅵ度”、“Ⅶ度”、“Ⅷ度”和“Ⅸ度”。由于地震基本烈度为Ⅸ度时，区域构造稳定性会被分级为“稳定性差”不具备建坝条件，确定该节点区间为“<Ⅵ度”、“Ⅵ度”、“Ⅶ度”和“Ⅷ度”。

(4)“岩性确定”计算区间。预可研阶段通过单轴抗压强度试验进行岩性确定。根据《工程岩体分级标准》(GB 50218—2014)^[41]，按照饱和单轴抗压强度确定该节点区间为“坚硬岩”“较硬岩”“较

表1 不同应力水平、弹性模量指数、破坏应力比以及围压条件下的切线弹性模量 E_t

Table1 E_t under varying stress levels, modulus exponents, fracture stress ratio and confining pressures

σ_3/Pa		$n(R_f=0.8)$				$n(R_f=0.9)$			
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5
$S_f=0.1$	2	0.97K'	1.04K'	1.12K'	1.20K'	0.95K'	1.02K'	1.09K'	1.17K'
	6	1.21K'	1.45K'	1.73K'	2.07K'	1.18K'	1.42K'	1.70K'	2.03K'
	10	1.34K'	1.69K'	2.13K'	2.68K'	1.31K'	1.65K'	2.08K'	2.62K'
	20	1.54K'	2.08K'	2.81K'	3.79K'	1.51K'	2.03K'	2.74K'	3.70K'
	30	1.67K'	2.35K'	3.30K'	4.64K'	1.63K'	2.30K'	3.23K'	4.54K'
$S_f=0.2$	2	0.81K'	0.87K'	0.93K'	1.00K'	0.77K'	0.83K'	0.89K'	0.95K'
	6	1.01K'	1.21K'	1.44K'	1.73K'	0.96K'	1.15K'	1.38K'	1.65K'
	10	1.12K'	1.41K'	1.77K'	2.23K'	1.07K'	1.34K'	1.69K'	2.13K'
	20	1.28K'	1.73K'	2.34K'	3.16K'	1.22K'	1.65K'	2.23K'	3.01K'
	30	1.39K'	1.96K'	2.75K'	3.86K'	1.33K'	1.87K'	2.62K'	3.68K'
$S_f=0.3$	2	0.66K'	0.71K'	0.76K'	0.82K'	0.61K'	0.66K'	0.70K'	0.75K'
	6	0.83K'	0.99K'	1.18K'	1.41K'	0.76K'	0.91K'	1.09K'	1.31K'
	10	0.92K'	1.15K'	1.45K'	1.83K'	0.84K'	1.06K'	1.34K'	1.69K'
	25	1.10K'	1.52K'	2.09K'	2.89K'	1.01K'	1.40K'	1.93K'	2.66K'
	30	1.14K'	1.60K'	2.25K'	3.16K'	1.05K'	1.48K'	2.08K'	2.92K'
$S_f=0.4$	2	0.53K'	0.57K'	0.61K'	0.65K'	0.47K'	0.50K'	0.54K'	0.58K'
	6	0.66K'	0.79K'	0.95K'	1.13K'	0.59K'	0.70K'	0.84K'	1.00K'
	10	0.73K'	0.92K'	1.16K'	1.46K'	0.65K'	0.82K'	1.03K'	1.30K'
	20	0.84K'	1.14K'	1.53K'	2.07K'	0.75K'	1.01K'	1.36K'	1.83K'
	30	0.91K'	1.28K'	1.80K'	2.53K'	0.81K'	1.14K'	1.60K'	2.24K'

注:K'表示弹性模量系数与大气压的乘积,即 $K \cdot P_a$ 。

软岩”“软岩及极软岩”。

(5)“设防烈度”计算区间。预可研阶段通过开展地震安全性评价工作确定不同超越概率水平下的场址地震动参数。根据《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015)^[42],确定该节点区间为“Ⅵ度”、“Ⅶ度”、“Ⅷ度”和“Ⅸ度”。

(6)“初选坝型”计算区间。可研阶段通过开展坝型比选研究明确代表性坝型。根据土石坝防渗体系和坝壳料的布置关系,确定该节点区间为“面板坝”和“心墙坝”。

(7)“坝高”计算区间。可研阶段通过开展正常蓄水位专题研究确定坝顶高程。根据“设防烈度”和《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015),确定该节点区间为 $h < 30 \text{ m}$ 、 $30 \text{ m} \leq h < 70 \text{ m}$ 、 $70 \text{ m} \leq h < 100 \text{ m}$ 、 $100 \text{ m} \leq h < 150 \text{ m}$ 、 $150 \text{ m} \leq h < 200 \text{ m}$ 和 $h \geq 200 \text{ m}$ 。

(8)“坡比”和“孔隙率”计算区间。《碾压式土石坝设计规范》(NB/T 10872—2021)有关条文规定,拟建土石坝坡比和孔隙率的确定需要综合考虑坝料岩性、设防烈度和碾压标准。根据数据库中“坡比”和“孔隙率”统计资料的系统分析,确定“坡比”区间为(1:1.2, 1:1.4]、(1:1.4, 1:1.5]、(1:1.5, 1:1.7]、(1:1.7, 1:2.1]和(1:2.1, 1:3.0],“孔隙率”区间为[16%, 19%)、[19%, 20%)、[20%, 21%)、[21%, 22%)和[22%, 26%)。

3.2.3 节点先验概率和条件概率 按照节点分区,对统计数据库样本进行各贝叶斯节点分区整理,并计算先验概率。根据贝叶斯网络映射关系,按照式(4)—(6)确定节点间的条件概率^[8]。

$$P(B_i=E|A_i=E, A_2=\text{其他})=1 \quad (4)$$

表2 工程设计参数和弹性模量系数 K 统计^[19-33]Table 2 Statistical of engineering design parameters and elastic modulus coefficient K

坝名	分区	岩性	饱和单轴抗压强度	坝型	坝高/m	基本烈度	设防烈度	坡比	孔隙率/%	弹性模量系数 K
SBY	主堆石	灰岩	63~94.7	CFRD	233	6	7	1:1.4	19.6	1400
PBG	主堆石	花岗岩	100	CRD	186	7	8	1:2.0	22	1078
CHB	主堆石	花岗岩	87.4~127	CRD	240	8	9	1:2.0	21	776
SJK	主堆石	变质砂岩	61.5~115.8	CRD	314	7	8	1:2.0	23	1050
QX	主堆石	角砾岩	116~125	CRD	164	8	8	1:1.9	21	912
LHK	主堆石	砂岩	≥ 45	CRD	295	8	8	1:1.9	22	1093
HZY	主堆石	灰岩	>55	CFRD	223.5	8	8	1:1.4	19	1050
HJD	主堆石	灰岩	50~90	CFRD	179.5	6	6	1:1.4	20	1700
TSQYJ	主堆石	灰岩	71.1~86.9	CFRD	178	6	7	1:1.4	23	940
ZPP	主堆石	石灰岩	56~72	CFRD	158	7	8	1:1.4	21	1090
JDX	主堆石	灰岩	72.9~80	CFRD	133	7	8	1:1.4	19	1400
GBX	主堆石	花岗岩	≥ 60	CFRD	132.2	7	8	1:1.4	20	750
JPH	主堆石	砾岩	41.3~107	CFRD	219	6	6	1:1.4	19	1000
YLKS	主堆石	花岗岩	42.7~94.2	CFRD	233.5	8	9	1:1.5	18	900
YQ	主堆石	灰岩	27~49	CFRD	150	7	8	1:1.4	20	1413
QZPZ	主堆石	灰岩	42.5~73.55	CFRD	157	6	7	1:1.4	20	1185
JY	主堆石	灰岩	45~71	CFRD	150	6	7	1:1.4	20	1181
RM	主堆石	英安岩	40~70	CFRD	315	7	8	1:1.45	18	1412
GS	主堆石	灰岩	≥ 60	CFRD	240	7	8	1:1.5	18	1350
SBX	主堆石	砂岩	200~300	CFRD	185.5	6	7	1:1.4	20	1200
DQ	主堆石	砂泥岩	46~60	CFRD	150	6	6	1:1.4	20	646
HBLSS	主堆石	片麻岩	40~60	CFRD	117	6	7	1:1.4	21	1140
HNLS	主堆石	花岗岩	60~70	CFRD	65	6	7	1:1.4	21	1100
GGS	主堆石	花岗岩	50~70	CFRD	88	7	7	1:1.4	19	1112
GSYMS	主堆石	灰岩	>30	CFRD	61	8	9	1:1.7	20	502
XJHJ	主堆石	灰岩	36~126	CFRD	79	8	9	1:1.7	19	1025
GXGYS	主堆石	花岗岩	60~70	CFRD	110	6	7	1:1.4	21	1030
GXNLS	主堆石	花岗岩	50~70	CFRD	92.5	6	7	1:1.4	20	1300

注:CFRD为混凝土面板堆石坝,CRD为心墙堆石坝。

$$P(B_i=E|A_i=\text{其他}, A_2=E)=1 \quad (5)$$

$$P(B_i=E|A_i \neq E, A_2 \neq \text{其他})=1 \quad (6)$$

式中: A_1 、 A_2 为父节点; B_i 为其子节点; E 为确定概率; 1、0为两种概率状态, 分别表示发生与未发生。

表3列出了贝叶斯节点先验概率分布, 表4列出了“基本烈度”和“设防烈度”节点间的条件概率分布表, 表5以孔隙率在[20%, 21%)区间为例, 列出了“坡比”和“坝型”节点间的条件概率分布表。

3.3 弹性模量系数 K 快速估计方法 图3给出了

2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0

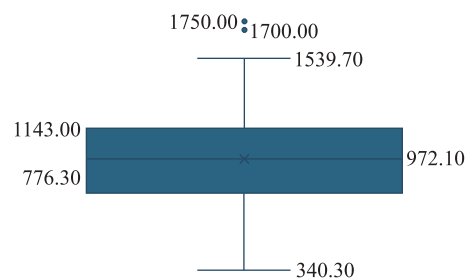
图2 弹性模量系数 K 箱型分布Fig. 2 Boxplot of elastic modulus coefficient K

表3 贝叶斯节点先验概率分布

Table 3 Prior probability distributions of Bayesian network nodes

贝叶斯节点	各节点区间划分	概率/%
弹性模量系数 K	[340, 780)	24.60
	[780, 1150)	52.20
	[1150, 1800)	23.20
简易岩性判断/MPa	<15	0.00
	≥ 15	100.00
基本烈度	<6	2.10
	6	34.70
	7	38.20
	8	25.00
设防烈度	6	4.20
	7	39.60
	8	34.00
	9	22.20
岩性确定	$R_c \leq 15$	5.00
	$15 < R_c \leq 30$	11.30
	$30 < R_c \leq 60$	44.70
	$R_c > 60$	39.00
预估坝高/m	[0, 30)	0.70
	[30, 70)	8.30
	[70, 200)	71.50
	[200, 320)	19.40
坝型	面板坝	66.70
	心墙坝	33.30
坝高/m	[0, 30)	0.70
	[30, 70)	8.30
	[70, 100)	38.80
	[100, 150)	17.40
	[150, 200)	15.30
	[200, 320)	19.40
坡比	(1:1.2, 1:1.4]	35.40
	(1:1.4, 1:1.5]	18.10
	(1:1.5, 1:1.7]	22.20
	(1:1.7, 1:2.1]	15.30
	(1:2.1, 1:3.0]	9.00
孔隙率	[16%, 19%)	5.90
	[19%, 20%)	16.20
	[20%, 21%)	32.40
	[21%, 22%)	25.00
	[22%, 26%)	20.60

基于贝叶斯的坝料弹性模量系数 K 网络模型架构，各节点概率四舍五入后取整。

弹性模量系数 K 快速估计方法操作流程如下：

表4 基本烈度和设防烈度条件概率分布

Table 4 Conditional probability distributions of basic intensity and fortification intensity

基本烈度	设防烈度			
	6	7	8	9
<6	0.00%	3.60%	0.00%	0.00%
6	100.00%	80.00%	0.00%	0.00%
7	0.00%	16.40%	87.20%	6.60%
8	0.00%	0.00%	12.80%	93.40%

表5 孔隙率在[20%,21%)区间范围内的坡比和坝型条件概率分布表

Table 5 Conditional probability distribution table of slope ratio and dam type for porosity in [20%,21%) range

坝型	坡比			
	(1:1.2,1:1.4]	(1:1.4,1:1.5]	(1:1.5,1:1.7]	(1:1.7,1:2.1]
面板坝	66.70%	19.40%	92.60%	65.90%
心墙坝	33.30%	80.60%	7.40%	34.10%

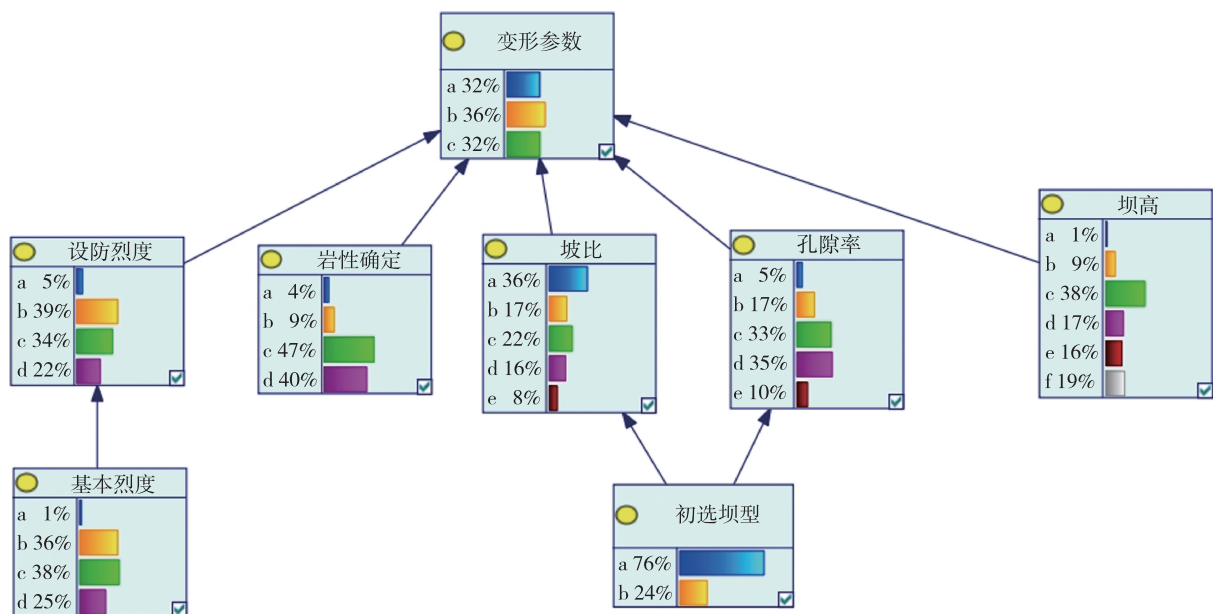


图3 基于贝叶斯网络的坝料弹性模量系数K模型架构

Fig. 3 Architecture of Bayesian network-based model for elastic modulus coefficient K of dam materials

注:各节点区间含义为(1)“初选坝型”节点分区:a表示面板坝,b表示心墙坝;(2)“基本烈度”节点区间:a表示<6度,b表示6度,c表示7度和d表示8度;(3)“设防烈度”节点区间:a表示6度;b表示7度;c表示8度;d表示9度;(4)“岩性确定”节点区间:a表示软岩及极软岩;b表示较软岩;c表示较硬岩,d表示坚硬岩。由于未统计到点荷载测试数据,参考《工程岩体分级标准》(GB 50218—2014)^[24]进行规划阶段的初判;(5)“坡比”节点区间:a表示(1:1.2,1:1.4];b表示(1:1.4,1:1.5];c表示(1:1.5,1:1.7];d表示(1:1.7,1:2.1];e表示(1:2.1,1:3.0];(6)“孔隙率”节点区间:a表示[16%,19%);b表示[19%,20%);c表示[20%,21%);d表示[21%,22%);e表示[22%,26%);(7)“坝高”节点区间:a表示[0,30 m);b表示[30,70 m);c表示[70,100 m);d表示[100,150 m);e表示[150,200 m);f表示[200,320 m)。

(1)根据图1所示的坝料变形特性贝叶斯网络模型架构,结合统计数据库,建立基于贝叶斯的坝料弹性模量系数K网络模型架构,如图3所示。

(2)根据前期决策各阶段勘测工作成果,确定本阶段节点取值区间,计算弹性模量系数K各分区概率,并给出各自阶段弹性模量系数K的取值推荐区间。

(3)根据前期决策各阶段弹性模量系数K取值区间变化,初判参数变化趋势和土石料变形性态。

4 工程案例分

4.1 工程概况 某水电站以发电为主, 兼顾城市和农田防洪任务, 并有改善航运、发展旅游业等综合利用效益。水库正常蓄水位 812 m, 总库容 $237.03 \times 10^8 \text{ m}^3$, 调节库容 $113.35 \times 10^8 \text{ m}^3$, 具有多年调节能力, 电站装机容量 5850 MW^[43-44]。工程坝址区地震基本烈度为Ⅷ度, 拟定坝址区大坝的抗震设防烈度为Ⅷ度^[45-47]。本工程拦河大坝坝型采用砾质土心墙堆石坝, 最大坝高为 261.5 米。大坝上、下游坡比分别为 1:1.9 和 1:1.8。Ⅱ区坝壳料料源选择为枢纽区开挖的弱风化及以下沉积岩(为软、硬岩混合料)及强风化花岗岩。其饱和单轴抗压强度为 16.9~37.5 MPa, 软化系数为 0.52~0.78。该堆石料分区设计孔隙率为 25.0%。大坝典型剖面及其分区见图 4。

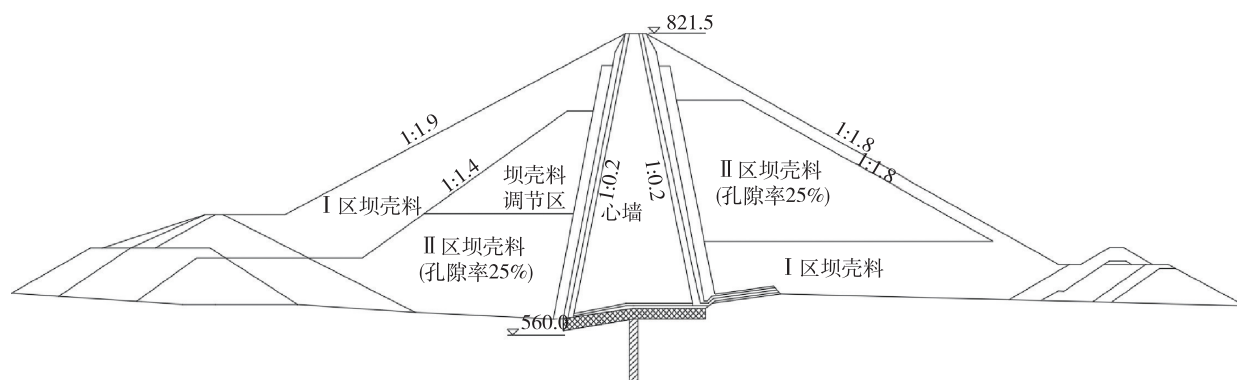


图4 设计坝剖面及其分区^[38]

Fig. 4 Designed dam cross-section and dam material zoning

4.2 前期决策不同阶段弹性模量系数 K 取值范围估计

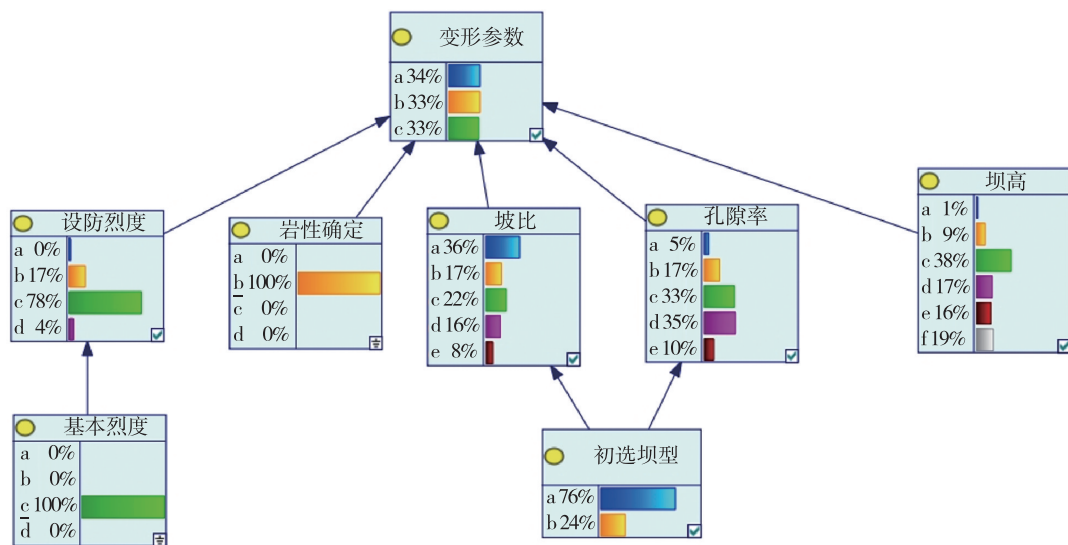
4.2.1 规划阶段 在规划阶段, 本工程坝址区地震基本烈度为Ⅷ度。坝址附近天然建筑材料以沉积岩、砾岩和花岗岩为主, 根据《工程岩体分级标准》(GB 50218—2014), 可初步判别为硬质岩, 饱和单轴抗压强度 $\geq 15 \text{ MPa}$, 可能为较软岩、较硬岩和坚硬岩。在确定“基本烈度”和“简易岩性判断”节点的前提下得到图 5 所示的规划阶段弹性模量系数 K 概率分布图。

由图 5 可知, 当岩性为较软岩时弹性模量系数 K 在 [340, 780)、[780, 1150) 和 [1150, 1800) 区间的概率分别为 34%、33% 和 33%; 当岩性为较硬岩时弹性模量系数 K 在上述各区间的概率分别为 32%、38% 和 30%; 当岩性为坚硬岩时弹性模量系数 K 在上述各区间的概率分别为 30%、36% 和 33%。表明, 当岩性为较软岩时, 变形模量系数 K 的建议取值区间为 [340, 780); 当岩性为较硬岩时, 变形模量系数 K 的建议取值区间为 [780, 1150); 当岩性为坚硬岩时, 变形模量系数 K 的建议取值区间为 [780, 1150)。

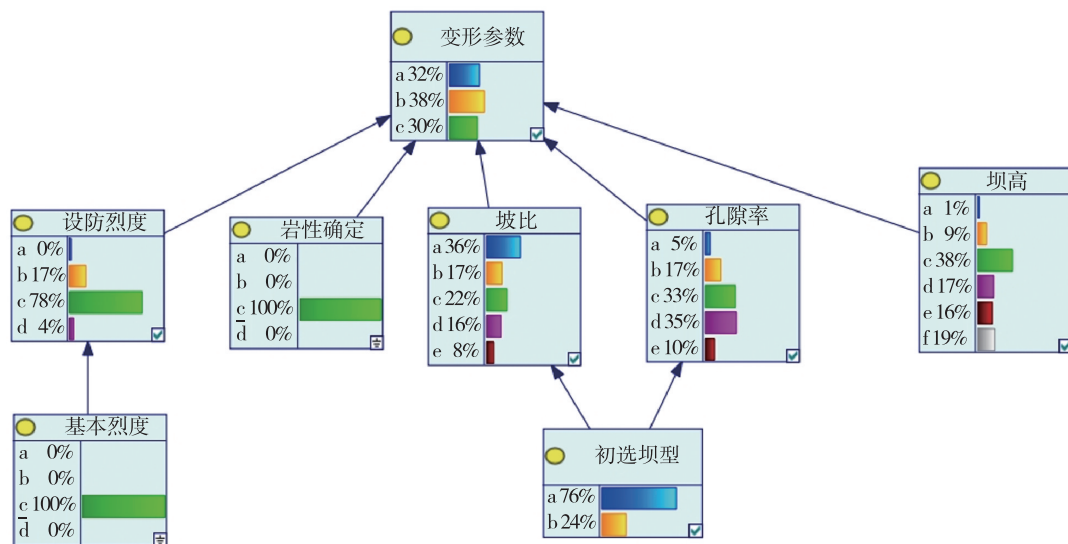
4.2.2 预可研阶段 在预可研阶段, 根据地震安全性评价、岩土物理特性试验和坝址勘察测绘成果, 分别确定拟定坝址区大坝的抗震设防烈度为Ⅷ度, Ⅱ区坝壳料饱和单轴抗压强度为 16.9~37.5 MPa、坝高大于 200 m。在确定“岩性确定”、“设防烈度”和“预估坝高”节点的前提下得到如图 6 所示的预可研阶段弹性模量系数 K 概率分布图。

由图可知, 本阶段在增加了“设防烈度”、“岩性确定”和“预估坝高”的影响因素作用下, 弹性模量系数 K 在 [340, 780)、[780, 1150) 和 [1150, 1800) 区间的概率分别调整为 25%、25% 和 49%, 在 [1150, 1800) 区间的取值概率由规划阶段的 33% 增加至 49%, 提高幅度接近 50%, 该阶段弹性模量系数 K 的建议取值区间为 [1150, 1800)。

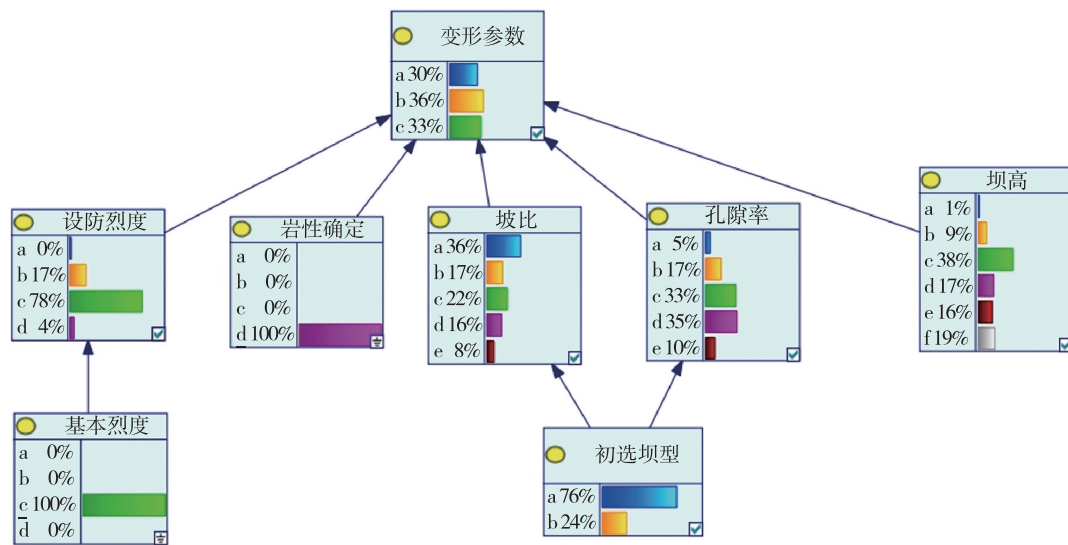
4.2.3 可研阶段 在可研阶段, 本工程明确了工程等别、设计标准、正常蓄水位、工程总体布置和坝型(砾质土心墙堆石坝), 最大坝高为 261.5 m, 上、下游坡比分别为 1:1.9 和 1:1.8, Ⅱ区坝壳料设计孔



(a) 岩性为较软岩



(b) 岩性为较硬岩



(c) 岩性为坚硬岩

图 5 规划阶段弹性模量系数 K 概率分布

Fig. 5 Probability distribution of elastic modulus coefficient K in planning phase

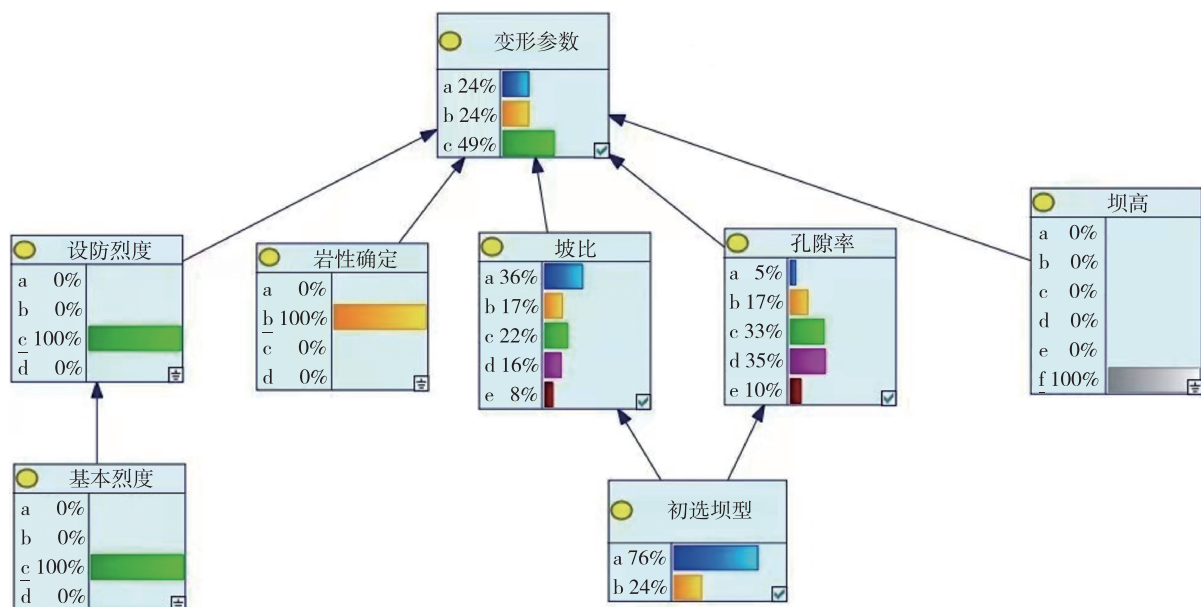


图6 预可阶段变形模量系数 K 概率分布

Fig. 6 Probability distribution of deformation modulus coefficient K in pre-feasibility study stage

隙率为25.0%。在确定“坝型”、“坡比”和“孔隙率”节点的前提下得到如图7所示的可研阶段弹性模量系数 K 概率分布。

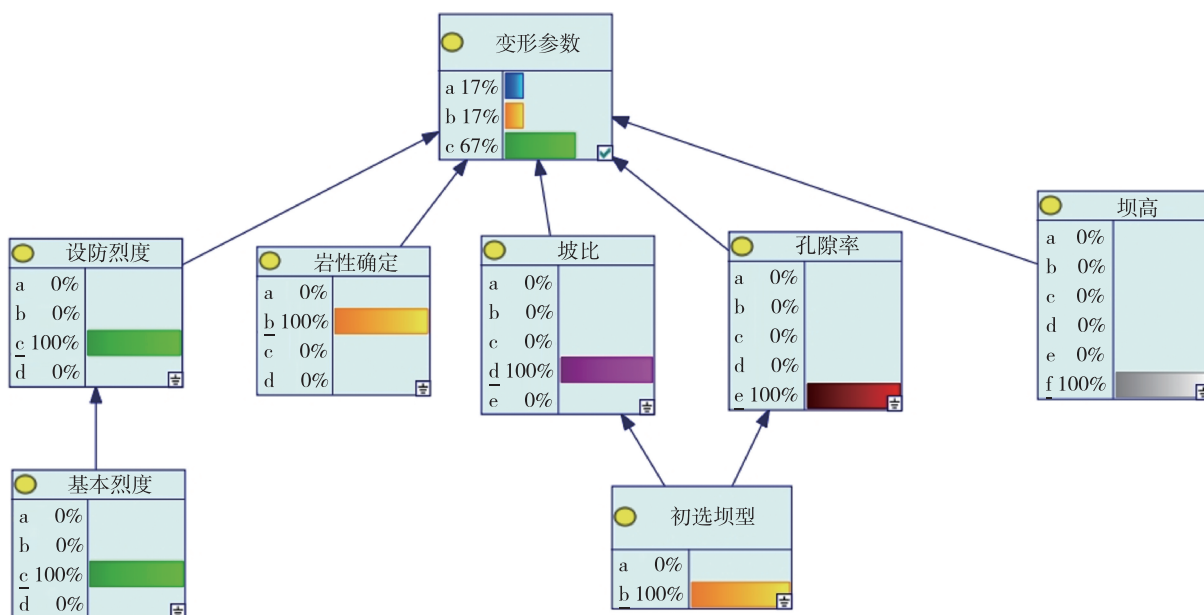


图7 可研阶段参数分布概率

Fig. 7 Probability distribution of parameters in feasibility stage

由图可知，本阶段在增加了“坝型”、“坡比”和“孔隙率”的影响因素作用下，弹性模量系数 K 在 $[340, 780)$ 、 $[780, 1150)$ 和 $[1150, 1800)$ 区间的概率分别为17%、17%和67%，在 $[1150, 1800)$ 区间的取值概率由预可研阶段的49%增加至67%，该阶段弹性模量系数 K 的建议取值区间为 $[1150, 1800)$ 。

根据相关文献^[48-49]，该工程在可研后期开展了系列三轴试验，确定的Ⅱ区坝壳料弹性模量系数 K 值为1524.5。试验成果处于本文的建议取值区间内，所提出的弹性模量系数 K 快速估计方法在该工程具有较好的适用性。

5 结论

本文基于贝叶斯网络,结合国内已建、在建和规划的土石坝工程设计资料,建立了土石坝统计数据库,提出了一种基于贝叶斯网络的土石料弹性模量系数 K 快速估计方法,并通过实际工程应用对该方法进行了系统验证。主要研究结论如下:(1)根据勘测规范在前期决策阶段工作内容,从地震荷载、坝料物理特性和大坝结构特性三个方面,确定了“基本烈度”、“设防烈度”、“简易岩性判别”、“岩性确定”、“初选坝型”、“坡比”、“孔隙率”和“坝高”等8个贝叶斯网络节点,建立了土石料变形特性网络模型架构。(2)基于国内69个土石坝工程资料,建立了统计数据库,通过参数箱型图和规范建议区间,确定了各节点的计算区间、先验概率和条件概率,提出了基于贝叶斯网络的坝料弹性模量系数 K 快速估计方法。(3)经对西部某工程的Ⅱ区坝壳料弹性模量系数 K 进行不同阶段取值区间估计,给出了前期决策不同阶段弹性模量系数 K 的概率分布和建议取值区间。弹性模量系数 K 在 $[1150, 1800)$ 区间的概率由规划阶段的33%增加至预可研阶段的49%,在可研阶段增加至67%,并最终确定建议取值区间为 $[1150, 1800)$ 。可研阶段后期Ⅱ区坝壳料三轴试验确定的弹性模量系数 K 在建议的取值区间内,验证了本文方法在实际工程中的适用性,可为同类型工程前期决策阶段变形安全评价中土石坝坝料弹性模量系数 K 的取值提供参考依据。

参 考 文 献:

- [1] 国家能源局. 水电工程可行性研究报告编制规程: NB/T 11013—2022[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022. (National Energy Administration. Specification for Preparation of Feasibility Study Report for Hydropower Projects: NB/T 11013—2022[S]. Beijing: China Water Power Press, 2022. (in Chinese))
- [2] 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范: SL 274—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design Specification for Rolled Earth-Rockfill Dams SL 274—2020 [S]. Beijing: China Water Power Press, 2020. (in Chinese))
- [3] 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范: NB/T 10872—2021[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for Design of Roller-Compacted Embankment Dams: NB/T 10872—2021[S]. Beijing: China Water Power Press, 2021. (in Chinese))
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水力发电工程地质勘察规范: GB 50287—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Hydropower Engineering Geological Investigation: GB 50287—2016[S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese))
- [5] 汪小刚. 岩体工程力学参数取值方法研究 I: 原位试验与定量类比[J]. 水利学报, 2023, 54(1): 13-23. (WANG Xiaogang. Study of determination methods of rock mass mechanical parameters I: In-situ test and quantitative analogy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(1): 13-23. (in Chinese))
- [6] 邹德高, 宁凡伟, 刘京茂, 等. 基于超大型三轴仪的堆石料动力特性缩尺效应研究[J]. 水利学报, 2024, 55(5): 528-536. (ZOU Degao, NING Fanwei, LIU Jingmao, et al. Experimental study on scale effect of dynamic characteristics on rockfill materials using super large-scale triaxial apparatus[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(5): 528-536. (in Chinese))
- [7] 杨光伟, 赵军霖, 黄建, 等. 含石量对砂卵石土的颗粒破碎及强度与变形的影响研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(3): 277-286. (YANG Guangwei, ZHAO Junlin, HUANG Jian, et al. Influence of gravel content on particle breakage, strength and deformation of sandy pebble soil[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(3): 277-286. (in Chinese))
- [8] HECKERMAN D. A tutorial on learning with Bayesian networks [J]. Learning in graphical models, 1998: 301-354.

- [9] 赵邵峰, 徐力群, 张宏伟, 等. 考虑坝基防渗体渗透溶蚀效应的特高土心墙堆石坝服役年限可靠性分析[J]. 水利学报, 2024, 55(11): 1391-1403, 1416. (ZHAO Shaofeng, XU Liquan, ZHANG Hongwei, et al. Reliability analysis of service life for ultra-high core-wall rockfill dam considering the seepage-dissolution effect of dam foundation impervious structure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(11): 1391-1403, 1416. (in Chinese))
- [10] 刘彪, 赵宇飞, 陈祖煜, 等. 小样本条件下砂砾石坝料级配特征参数的贝叶斯估计方法[J]. 水利学报, 2022, 53(5): 608-620. (LIU Biao, ZHAO Yufei, CHEN Zuyu, et al. Bayesian estimation method for grading characteristic parameters of sand-gravel dam material under small sample condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(5): 608-620. (in Chinese))
- [11] 林鹏远, 李宏恩, 徐康, 等. 基于贝叶斯网络的某水库大坝渗漏风险分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(11): 110-120. (LIN Pengyuan, LI Hongen, XU Kang, et al. Bayesian network-based analysis on seepage risk of a reservoir dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(11): 110-120. (in Chinese))
- [12] 段淑倩, 赵庚辰, 熊杰程, 等. 基于贝叶斯优化的改进地应力分级判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(10): 2405-2413. (DUAN Shuqian, ZHAO Gengchen, XIONG Jiecheng, et al. Improved geostress grading criteria based on Bayesian optimization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(10): 2405-2413. (in Chinese))
- [13] 徐娜, 朱磊. 耦合S曲线和贝叶斯网络的水利工程成本-进度仿真分析及应用[J]. 中国农村水利水电, 2017, (10): 163-168. (XU Na, ZHU Lei. Hydraulic engineering cost-schedule simulation method and application based on S-Curve and Bayesian network[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, (10): 163-168. (in Chinese))
- [14] 周建方, 唐椿炎, 许智勇. 贝叶斯网络在大坝风险分析中的应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 192-196. (ZHOU Jianfang, TANG Chunyan, XU Zhiyong. Application of Bayesian networks to dam risk analysis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 192-196. (in Chinese))
- [15] 汪小刚. 高土石坝几个问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 203-222. (WANG Xiaogang. Discussion on some problems observed in high earth-rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 203-222. (in Chinese))
- [16] 温彦锋, 邓刚, 王玉杰. 岩土工程研究60年回顾与展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 343-352. (WEN Yanfeng, DENG Gang, WANG Yujie. Review of geotechnical engineering research at IWHR in the last 60 years and its future development[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5): 343-352. (in Chinese))
- [17] 于荣萍, 朱凯斌, 杨正权, 等. 高面板坝土工格栅加固机制及抗震加固效果分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(3): 245-253. (YU Rongping, ZHU Kaibin, YANG Zhengquan, et al. Reinforcement mechanism and seismic evaluation of reinforced high CFRD with geogrid[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(3): 245-253. (in Chinese))
- [18] 马洪玉, 李敬军, 朱凯斌, 等. 基于CEL方法的带结构物溃坝流数值模拟[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(2): 159-168. (MA Hongyu, LI Jingjun, ZHU Kaibin, et al. Numerical simulation of dam-break flow with obstacle based on CEL[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(2): 159-168. (in Chinese))
- [19] JI L H, JING W. Prediction of liquefaction of gravelly soils based on a cost-sensitive Bayesian network combined with rough set weighting[J]. Gondwana Research, 2024, 131: 57-68.
- [20] JI L H. A new approach for constructing two Bayesian network models for predicting the liquefaction of gravelly soil[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 137: 104304.
- [21] HU J, WANG J. A data extension framework of seismic-induced gravelly soil liquefaction based on semi-supervised methods[J]. Adv. Eng. Inform., 2024, 59: 102295.
- [22] HU J, WANG J. Influence of data quality on the performance of supervised classification models for predicting gravelly soil liquefaction[J]. Eng. Geol., 2023, 324: 107254.
- [23] 黄茂松, 姚仰平, 尹振宇, 等. 土的基本特性及本构关系与强度理论[J]. 土木工程学报, 2016, 49(7): 9-35. (HUANG Maosong, YAO Yangping, YIN Zhenyu, et al. An overview on elementary mechanical behaviors,

- constitutive modeling and failure criterion of soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(7): 9-35. (in Chinese))
- [24] 王博文. 考虑统计不确定性的堆石坝坝坡稳定可靠度分析方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2019. (WANG Bowen. Reliability analysis methods for rockfill dam slope stability considering statistical uncertainty [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese))
- [25] 邹德高, 刘京茂, 宁凡伟, 等. 基于超大型三轴试验和原型监测的堆石料模型参数缩尺效应修正[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(12): 2476-2483. (ZOU Degao, LIU Jingmao, NING Fanwei, et al. Modification of scale effects of constitutive model parameters using super large-scale triaxial tests and in-situ monitoring data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(12): 2476-2483. (in Chinese))
- [26] 孔宪京, 宁凡伟, 刘京茂, 等. 基于超大型三轴仪的堆石料缩尺效应研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 255-261. (KONG Xianjing, NING Fanwei, LIU Jingmao et al. Scale effect of rockfill materials using super-large triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 255-261. (in Chinese))
- [27] 刘小生, 刘启旺, 王钟宁, 等. 联合室内和现场试验确定土体本构模型参数方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(3): 220-225. (LIU Xiaosheng, LIU Qiwan, WANG Zhongning, et al. Investigation on methods of determining constitutive parameters of soil by combining laboratory and field tests[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, 4(3): 220-225. (in Chinese))
- [28] 邓成进, 周恒, 党发宁, 等. 高面板砂砾石坝堆石料力学变形特性及坝体分区研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(S1): 54-58. (DENG Chengjin, ZHOU Heng, DANG Faning, et al. Mechanical deformation characteristics of rockfill and dam body zoning of high concrete face gravel dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(S1): 54-58. (in Chinese))
- [29] 牟声远, 王正中. 堆石料邓肯张模型的参数敏感性与统计分析[J]. 中国农村水利水电, 2009(3): 97-100. (MU Shengyuan, WANG Zhengzhong. Duncan-chang model parameters sensitivity and statistical analysis of rockfills [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(3): 97-100. (in Chinese))
- [30] 毛航宇, 刘斯宏, 沈超敏, 等. 温湿度联合作用下软岩粗粒料三轴剪切力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(3): 587-595. (MAO Hangyu, LIU Sihong, SHEN Chaomin, et al. Triaxial shear mechanical properties of weak rock coarse granular materials subjected to temperature and relative humidity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(3): 587-595. (in Chinese))
- [31] 杨鸽, 朱晟. 考虑堆石料空间变异性的土石坝地震反应随机有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1822-1832. (YANG Ge, ZHU Sheng. Seismic response of rockfill dams considering spatial variability of rockfill materials via random finite element method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1822-1832. (in Chinese))
- [32] 袁艳玲, 郭琴琴, 周正军, 等. 考虑参数相关的高心墙堆石坝材料参数反分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(S1): 463-470. (YUAN Yanling, GUO Qinqin, ZHOU Zhengjun, et al. Back analysis of material parameters of high core rockfill dam considering parameters correlation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 463-470. (in Chinese))
- [33] 武利强, 叶飞, 林万青. 堆石料力学特性缩尺效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 141-145. (WU Liqiang, YE Fei, LIN Wanqing. Experimental study on scale effect of mechanical properties of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 141-145. (in Chinese))
- [34] 姚仰平, 朱丙龙, 刘林. 不同类土的基本力学特性差异性描述[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1): 33-46. (YAO Yangping, ZHU Binglong, LIU lin. Differential description of basic mechanical properties of different soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(1): 33-46. (in Chinese))
- [35] 杜俊, 朱维伟, 沈兴刚. 宽级配粗粒土压缩变形特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(6): 50-56. (DU Jun, ZHU Weiwei, SHEN Xinggang. Experimental study on compression deformation characteristics of coarse-grained soils[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(6): 50-56. (in Chinese))
- [36] 温立峰, 柴军瑞, 许增光, 等. 面板堆石坝性状的初步统计分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1312-1320. (WEN Lifeng, CHAI Junrui, XU Zengguang, et al. Preliminary statistical analysis of behavior of concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1312-1320. (in Chinese))
- [37] 罗万年. 土石坝料应力变形参数的概率分布模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2023. (LUO Wannian.

- Study on Probability Distribution Model of Stress Deformation Parameters of Earth-rock Dam Materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023. (in Chinese))
- [38] 李炎隆, 李守义, 丁占峰, 等. 基于正交试验法的邓肯-张 E-B 模型参数敏感性分析研究[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 873-879. (LI Yanlong, LI Shouyi, DING Zhanfeng, et al. The sensitivity analysis of Duncan-Chang E-B model parameters based on the orthogonal test method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 873-879. (in Chinese))
- [39] 刘海兰, 李君师, 柯洪, 等. 岩石点荷载强度与单轴饱和抗压强度相互关系分析研究[J]. 电力勘测设计, 2025(01): 49-54. (LIU Hailan, LI Junshi, KE Hong, et al. Analysis of the relationship between rock point load strength and uniaxial saturated compressive strength[J]. Electric Power Survey & Design, 2025(01): 49-54. (in Chinese))
- [40] 全国地震标准化技术委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. (National Technical Committee on Earthquake Standardization. Seismic Ground Motion Parameter Zonation Map of China: GB 18306—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese))
- [41] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Engineering Classification of Rock Masses: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese))
- [42] 国家能源局. 水电工程水工建筑物抗震设计规范: NB 35047—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015. (National Energy Administration. Code for Seismic Design of Hydraulic Structures of Hydropower Project: NB 35047—2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (in Chinese))
- [43] 张宗亮. 糯扎渡水电站工程特点及关键技术研究[J]. 水力发电, 2005(5): 4-7. (ZHANG Zongliang. The project characteristics of Nuozhadu Hydropower Station and its key technology research results[J]. Water Power, 2005(5): 4-7. (in Chinese))
- [44] 马洪琪, 赵川. 糯扎渡水电站掺砾黏土心墙堆石坝基础理论与关键技术研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 208-212. (MA Hongqi, ZHAO Chuan. Study on fundamental theories and key technologies for rock-fill dam with gravel-clay core wall of Nuozhadu hydropower project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 208-212. (in Chinese))
- [45] 袁友仁, 张宗亮, 冯业林, 等. 糯扎渡心墙堆石坝设计[J]. 水力发电, 2012, 38(9): 27-30. (YUAN Youren, ZHANG Zongliang, FENG Yelin, et al. Design of Nuozhadu Core Rockfill Dam[J]. Water Power, 2012, 38(9): 27-30. (in Chinese))
- [46] 张培文, 陈祖煜. 糯扎渡大坝设计边坡稳定的有限元分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(3): 43-46. (ZHANG Peiwen, CHEN Zuyu. Finite element analysis of slope stability in Nuozhadu dam design[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003, 1(3): 43-46. (in Chinese))
- [47] 董威信, 袁会娜, 徐文杰, 等. 糯扎渡高心墙堆石坝模型参数动态反演分析[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 203-208. (DONG Weixing, YUAN Huina, XU Wenjie, et al. Dynamic back-analysis of material parameters of Nuozhadu high earth-rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 203-208. (in Chinese))
- [48] 雷红军, 冯业林, 刘兴宁. 糯扎渡水电站大坝应力变形及抗水力劈裂特性研究[J]. 云南水力发电, 2014, 30(1): 4-6, 18. (LEI Hongjun, FENG Yelin, LIU Xingning. The study on the stress deformation and anti hydraulic fracturing characteristics of the dam of the Nuozhadu Hydropower Project[J]. Yunnan Water Power, 2014, 30(1): 4-6, 18. (in Chinese))
- [49] 古兴伟, 沈蓉, 张永全. 复杂应力路径下糯扎渡堆石料应力-应变特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S1): 3251-3260. (GU Xingwei, SHEN Rong, ZHANG Yongquan. Study on stress-strain properties of rockfill materials under different stress paths in nuozhadu project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(S1): 3251-3260. (in Chinese))

(下转第 437 页)

(上接第 425 页)

Rapid determination approach for elastic modulus coefficient of rockfill materials in rockfill dams at preliminary decision-making stage

ZHU Fangliang^{1,2}, ZHU Kaibin^{1,2}, YANG Zhengquan^{1,2}, LI Jingjun^{1,2}, YU Zhongyang^{1,2}, FAN Meng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Engineering Research Center on Anti-Earthquake and Emergency Support Techniques of Hydraulic Projects, Ministry of Water Resources, Beijing 100048, China)

Abstract: The monitoring and analysis of dam deformation constitutes a key component in the structural integrity analysis and safety assessment of embankment dams. The determination of deformation behavior parameters for dam construction materials forms the basis of deformation analysis in embankment dams. To address the common unavailability of experimentally determined deformation behavior parameters for dam construction materials during early-stage decision-making phases (planning, pre-feasibility, and initial feasibility studies), this study proposes a Bayesian network-based rapid determination method for the deformation modulus factor K . This approach provides preliminary value ranges for deformation analysis and safety assessment of embankment dams in project planning stages. The principal research findings and conclusions are as follows: (1) Eight Bayesian network nodes are identified across three domains (seismic loading, material-specific physical properties, and structural characteristics of embankment dams) and a computational framework is established for modeling deformation behavior characteristics of earth-rockfill materials. (2) Based on the compiled embankment dam statistical database, a Bayesian network-based framework is developed for rapid determination of the elastic modulus coefficient K in earth-rockfill materials. (3) Validation of the proposed rapid determination method is achieved through predicting value ranges of the elastic modulus coefficient K for rockfill zone materials in an embankment dam located in western China. This case study had confirmed the practical applicability of the method, establishing reference benchmarks for deformation parameter selection in safety evaluations of similar projects during early decision-making phases.

Keywords: bayesian network; earth-rock materials; assessment of deformation parameter; safety evaluation; determination prophase

(责任编辑: 李 娜)