

自然灾害下基础设施韧性指标与计算方法*

陆盟, 马翔宇, 张洁, 朱合华

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 由于自然灾害下基础设施安全性普遍较高, 现有韧性指标难以有效区分不同基础设施安全水平。针对上述不足, 首先通过表征自然灾害强度与基础设施参数不确定性, 求解给定时间段内多场自然灾害造成的基础设施功能损失期望值, 基于概率积分变换, 定义了能够有效区分不同基础设施安全水平的韧性指标。之后分别求解不确定性条件下基础设施受损概率、受损基础设施功能损失期望值以及受损基础设施恢复时间期望值, 构建了自然灾害下基础设施韧性高效计算方法。最后应用提出的韧性指标与计算方法, 研究了降雨条件下公路边坡韧性。结果表明, 公路边坡韧性指标与受损概率、功能损失期望值、恢复时间期望值均呈负相关关系, 其中受损概率对公路边坡韧性的影响程度最高。

关键词: 韧性指标; 基础设施; 自然灾害; 不确定性; 受损概率

中图分类号: X43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(XXXX)XX-0001-09

Resilience Index of Infrastructure under Natural Hazards and Its Calculation Method

LU Meng, MA Xiangyu, ZHANG Jie, ZHU Hehua

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Given the generally high level of infrastructure safety during natural hazards, existing resilience indexes struggle to effectively differentiate the varying safety levels of different infrastructures. To address the limitation, the uncertainties in natural hazard intensity and infrastructure parameters are first characterized to calculate the expected value of infrastructure functional losses caused by multiple natural hazards over a given time period. Based on the probability integral transform, a resilience index is defined that can effectively distinguish the safety levels of different infrastructures. Subsequently, the damage probability of infrastructure under uncertainty, the expected value of functional losses for damaged infrastructure, and the expected value of recovery time for damaged infrastructure are calculated respectively, thereby constructing an efficient calculation method for infrastructure resilience under natural hazards. Finally, the proposed resilience index and calculation method are applied to study the resilience of highway slopes under rainfall. The results indicate that the resilience index of

* 收稿日期:XXXX-XX-XX;修回日期:XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金项目(42402280)、中国博士后科学基金资助项目(2024M762422, 2025T180118)、上海自然科学基金项目(24ZR1469400)、上海超级博士后资助项目(2024567)、国家资助博士后研究人员计划(GZB20240533)

作者简介: 陆盟(1998—),男,博士后。主要从事岩土灾害韧性防控研究。E-mail: lumeng@tongji.edu.cn

通信作者: 张洁(1980—),男,教授,博导,博士。主要从事岩土灾害韧性防控研究。E-mail: cezhangjie@tongji.edu.cn

highway slopes exhibits a negative correlation with the damage probability, expected value of functional loss, and expected value of recovery time. Among these factors, the damage probability has the most significant impact on the resilience of highway slopes.

Keywords: resilience index; infrastructure; natural hazards; uncertainty; damage probability

0 引言

基础设施是社会发展的关键载体^[1]。近年来,暴雨、洪水、地震、滑坡等自然灾害频发,有效管控自然灾害下基础设施安全,对保障社会发展具有重要意义^[2]。韧性是指结构或系统遭受外部扰动时,维持与恢复自身功能的能力^[3,4]。基于韧性,可以对自然灾害下基础设施破坏与恢复过程进行全面评价,为有效管控自然灾害下基础设施安全提供有力支撑。

韧性评价方法可分为定性、半定量与定量三类^[5]。定性方法主要以构建韧性理论框架为目标。半定量方法基于专家经验或历史数据,从多个维度对韧性进行打分评价,操作方便,但因缺乏力学判据,难以指导工程实践。定量方法通过表征工程结构或系统的功能损失与恢复过程,构建韧性指标。其中,功能损失一般采用力学模型进行分析^[6,7],功能恢复一般基于经验公式进行预测^[8]。目前,定量方法已被广泛用于社区、机场、桥梁、隧道、公路边坡等基础设施韧性评价^[9],针对不同基础设施的韧性指标已被构建^[10]。Bruneau等学者通过计算地震造成的功能劣化程度,建立了社区韧性指标^[11]。Janic根据灾前与灾后的航班数量变化,定义了机场韧性指标^[12]。Dong与Frangopol^[13]、Huang等^[14]基于易损性分析,分别构建了地震作用下桥梁与隧道韧性指标。Zhang等^[15]基于车道堵塞造成的交通需求损失,提出了降雨诱发滑坡灾害下公路韧性指标。由于自然灾害下基础设施韧性评价涉及大量不确定性^[16],如灾害强度与基础设施参数的不确定性,部分学者通过量化基础设施功能演化的不确定性,构建了不确定条件下韧性指标^[17,18],为本文提供了有益参考。

然而,由于满足规范设计要求的基础设施安全性通常很高,自然灾害造成基础设施破坏属于小概率事件,现有韧性指标难以有效区分不同基础设施的安全水平。针对上述不足,本文首先通过表征自然灾害强度与基础设施参数不确定性,计算自然灾

害下基础设施功能损失期望值,基于概率积分变换,定义可以有效区分不同基础设施安全水平的韧性指标。之后,为便于工程应用,提出自然灾害下基础设施韧性高效计算方法。最后,将提出的指标与方法应用于降雨诱发滑坡灾害下公路韧性评价。研究成果可为自然灾害下基础设施韧性评价提供理论基础与技术参考。

1 自然灾害下基础设施韧性指标

图1展示了自然灾害下基础设施功能随时间演化过程,横坐标为时间 t ,纵坐标为功能 Q 。令 Q_0 表示基础设施的初始功能, $Q_0 = 100\%$ 。令 x 表示自然灾害强度,令 θ 表示基础设施参数。给定 x 与 θ ,一场自然灾害发生后,基础设施遭受的功能损失记作 $Q_l(x, \theta)$ 。基础设施的初始残余功能 $Q_r(x, \theta) = Q_0 - Q_l(x, \theta)$ 。令 Δt 表示基础设施功能从 $Q_r(x, \theta)$ 恢复至 Q_0 所需的时间,令 $Q_r(x, \theta, t)$ 表示恢复过程中,基础设施在 t 时刻的残余功能。单场自然灾害造成的基础设施功能累计损失 $A_l(x, \theta)$,可基于下式计算:

$$A_l(x, \theta) = Q_0 \Delta t - \int_{\Delta t} Q_r(x, \theta, t) dt \quad (1)$$

由于自然灾害强度与基础设施参数存在不确定性,导致基础设施残余功能存在显著变异性,然而鲜有文献明确考虑这两类不确定性开展韧性评估。令 $f(x)$ 表示自然灾害强度的概率密度函数,令 $f(\theta)$ 表示基础设施参数的概率密度函数。基于全概率理论,定义单场自然灾害造成的基础设施功能累计损失期望值 E_{A_l} ,表达式如下:

$$E_{A_l} = \int \dots \int A_l(x, \theta) f(x) f(\theta) dx d\theta \quad (2)$$

某时间段 T 内可能发生多场自然灾害,若要评估时间段 T 内基础设施韧性,需要考虑多场自然灾害的影响,然而现有研究大多聚焦于单灾害事件。假设给定时间段 T 内平均发生 n_T 场自然灾害,不同自然灾害间相互独立^[17,18]。定义 n_T 场自然灾害下基础设施功能累计损失期望值 $E_{A_{lT}}$,表达式如下:

$$E_{AIT} = \sum_{i=1}^{n_T} E_{A_i} \quad (3)$$

参考文献^[17, 18], 可将基础设施韧性指标定义为残余功能损失占比 $1 - E_{AIT}/Q_0T$ 。以 $T = 1$ 年为例, 不同 E_{AIT} 对应的韧性指标如表 1 所示。可以看到, 当基础设施功能累计损失 E_{AIT} 小于 10% 时, 经典韧性指标已趋近于 1^[17, 18], 难以进一步区分不同韧性水平。实际工程中, 满足规范设计要求的基础设施安全性通常较高, 自然灾害下基础设施的受损可能性很小。例如, 《工程结构可靠性设计统一标准》(GB50068-2018) 规定^[19], 标志性或特别重要的建筑结构在 100 年设计使用年限内的受损概率不应高于 $10^{-5} - 10^{-4}$ 。所以, 基于式(2)与式(3)求得的基础设施功能累计损失 E_{AIT} 一般会很小。为克服上述问题, 基于概率积分变换, 将自然灾害下基础设施韧性指标 γ_{Re} 定义如下:

$$\gamma_{Re} = \Phi^{-1}\left(1 - \frac{E_{AIT}}{Q_0T}\right) \quad (4)$$

式中: Φ^{-1} 为累计标准正态分布的逆函数。这里假设基础设施功能累计损失占比 E_{AIT}/Q_0T 服从正态

分布, 主要是由于该值受到自然灾害强度、设施参数、决策者主观判断等大量随机因素影响, 根据中心极限定理^[20], 可认为 E_{AIT}/Q_0T 近似服从正态分布。以上定义方式, 在可靠度理论中被广泛采用^[21-24]。同样以 $T = 1$ 年为例, 表 1 展示了不同 E_{AIT} 对应的韧性指标 γ_{Re} 。可以看到, 当基础设施平均功能损失降低至千分之一、十万分之一时, 韧性指标 γ_{Re} 仍能对其进行有效区分和评价。

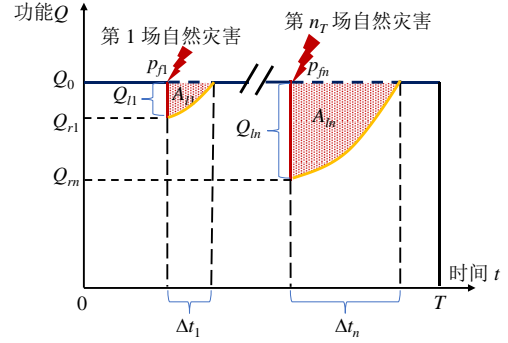


图 1 自然灾害下基础设施功能演化过程

Fig. 1 Evolution of infrastructure function under natural hazards

表 1 自然灾害下基础设施韧性指标随功能累计损失期望值 E_{AIT} 变化情况

Table 1 Variation of the resilience index of infrastructure under natural hazards with the expected cumulative functional loss E_{AIT}

E_{AIT}	含义	$1 - E_{AIT}/Q_0T$	γ_{Re}
0.8	一年内基础设施平均功能损失为十分之八	2×10^{-1}	-0.84
0.5	一年内基础设施平均功能损失为二分之一	5×10^{-1}	0
0.1	一年内基础设施平均功能损失为十分之一	9×10^{-1}	1.28
1×10^{-2}	一年内基础设施平均功能损失为百分之一	9.90×10^{-1}	2.33
1×10^{-3}	一年内基础设施平均功能损失为千分之一	9.99×10^{-1}	3.09
1×10^{-5}	一年内基础设施平均功能损失为十万分之一	9.99×10^{-1}	4.26

2 自然灾害下基础设施韧性高效计算方法

由于受损基础设施恢复过程受多因素制约, 为方便工程应用, 考虑恢复期间, 基础设施始终处于相同的残余功能状态, 直至恢复初始状态。此时, 图 1 中单场自然灾害造成的基础设施功能累计损失 $A_i(x, \theta)$, 可通过下式计算:

$$A_i(x, \theta) = Q_i(x, \theta) \Delta t \quad (5)$$

将式(5)代入式(2), 单场自然灾害造成的基础设施功能累计损失期望值 E_{A_i} , 表达如下:

$$E_{A_i} = \int \dots \int Q_i(x, \theta) \Delta t f(x) f(\theta) dx d\theta \quad (6)$$

为求解式(6), 将 $Q_i(x, \theta)$ 考虑为两部分进行分析。第一部分分析自然灾害下基础设施是否受损。 $g(x, \theta)$ 表示基础设施受损状态函数。当 $g(x, \theta) > 0$ 时, 自然灾害下基础设施未受损; 当 $g(x, \theta) \leq 0$ 时, 自然灾害下基础设施受损。给定 x 与 θ 条件下, 基础设施受损指示函数 $I[g(x, \theta)]$, 如下所示:

$$I[g(x, \theta)] = \begin{cases} 0 & g(x, \theta) > 0 \\ 1 & g(x, \theta) \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

第二部分分析受损条件下基础设施的功能损失, 记作 Q_i^* 。令 $f(Q_i^*)$ 表示 Q_i^* 的概率密度函数。将

$I[g(x, \theta)]$ 、 Q_i^* 、 $f(Q_i^*)$ 代入式(6),单场自然灾害造成基础设施功能累计损失期望值 E_{Ai} ,可采用下式计算:

$$E_{Ai} = \int \dots \iint I[g(x, \theta)] f(x) f(\theta) dx d\theta \int Q_i^* f(Q_i^*) \Delta t dQ_i^* \quad (8)$$

式(8)中左侧积分结果即为单场自然灾害下基础设施的受损概率 p_f ,表达如下:

$$p_f = \int \dots \iint I[g(x, \theta)] f(x) f(\theta) dx d\theta \quad (9)$$

式(9)可通过蒙特卡洛模拟近似求解, p_f 的估计误差可采用下式计算^[21]:

$$\sigma(p_f) \approx \sqrt{\frac{1-p_f}{N p_f}} \quad (10)$$

其中 N 为蒙特卡洛模拟的样本数。假设受损基础设施恢复时间与功能损失程度相互独立。令 $f(\Delta t)$ 表示受损基础设施恢复时间 Δt 的概率密度函数。式(8)中右侧积分可用于分别求解受损条件下基础设施功能损失期望值 E_{Qi} 与受损基础设施恢复时间期望值 $E_{\Delta t}$,公式如下:

$$E_{Qi} = \int Q_i^* f(Q_i^*) dQ_i^* \quad (11)$$

$$E_{\Delta t} = \int \Delta t f(\Delta t) d\Delta t \quad (12)$$

将式(9)、式(11)与式(12)代入式(8),单场自然灾害造成的基础设施功能累计损失期望值 E_{Ai} 计算公式进一步简化如下:

$$E_{Ai} = p_f E_{Qi} E_{\Delta t} \quad (13)$$

将式(13)代入式(3),给定时间段 T 内, n_T 场自然灾害造成的基础设施功能累计损失期望值 E_{AIT} ,可采用下式估算:

$$E_{AIT} = \sum_{i=1}^{n_T} p_{fi} E_{Q_{li}} E_{\Delta_{ti}} \quad (14)$$

将式(14)代入式(4),自然灾害下基础设施韧性指标 γ_{Re} 计算公式如下:

$$\gamma_{Re} = \Phi^{-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_T} p_{fi} E_{Q_{li}} E_{\Delta_{ti}}}{Q_0 T} \right) \quad (15)$$

由式(15)可知,自然灾害下基础设施受损概率越大、功能损失越高、恢复时间越长,基础设施功能累计损失占比越大、韧性越低。图2总结了自然灾害下基础设施韧性指标计算步骤:

- (1)构建自然灾害下基础设施受损分析模型;
- (2)标定自然灾害强度与基础设施参数概率模

型,计算基础设施受损概率;

(3)构建基础设施功能损失与恢复时间概率预测模型;

(4)求解受损条件下基础设施功能损失期望值与受损基础设施恢复时间期望值;

(5)求解给定时间段内基础设施功能累计损失期望值,计算韧性指标。

下文将通过降雨条件下公路边坡案例,详细展示自然灾害下基础设施韧性指标计算过程。

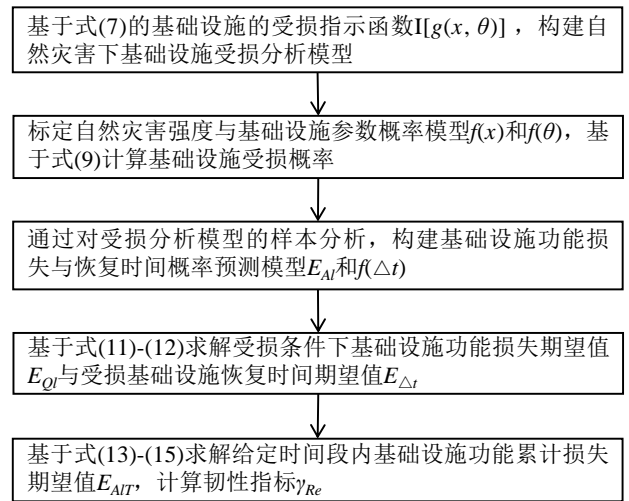


图2 自然灾害下基础设施韧性指标计算步骤

Fig.2 Calculation procedure for resilience index of infrastructure under natural hazards

3 案例分析

公路边坡属于一种常见的基础设施。降雨是威胁公路边坡安全的典型自然灾害,每年都会发生降雨诱发公路边坡失稳事件。开展降雨条件下公路边坡韧性评价,对防灾减灾具有重要意义。公路边坡功能在于维持交通正常运行,因此本案例将公路边坡功能定义为交通运输能力。降雨诱发公路边坡失稳后,滑体运动堵塞公路车道,导致交通运输能力下降,造成公路边坡功能受损。根据式(15),首先分析降雨条件下公路边坡的受损概率;之后概率预测受损公路边坡功能损失与恢复时间;最终计算一年内多场降雨事件造成公路边坡功能累计损失期望值,求解韧性指标。

图3(a)给出了某公路边坡几何模型。该边坡高10 m,坡度为45°,土体为匀质砂土。公路共有4个车道,单车道宽度为3.75 m。假设该边坡位于新

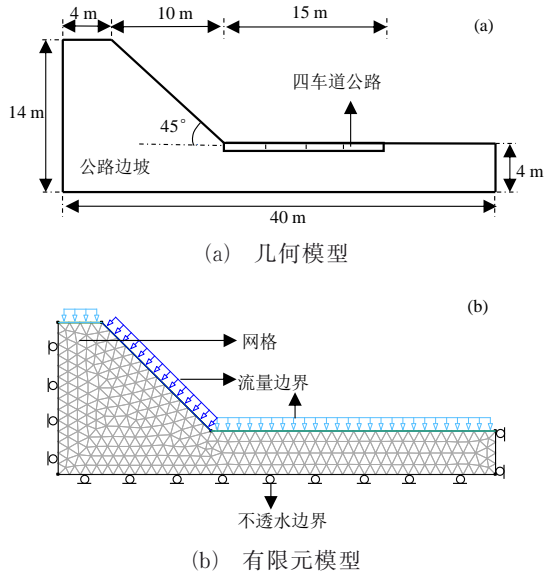


图 3 公路边坡模型

Fig. 3 Highway slope models

加坡地区。根据 Jun 等^[25]报道,新加坡地区一年内平均降雨事件数为 38 场。

3.1 降雨入渗边坡稳定性分析

基于安全系数 FOS 构建边坡受损状态函数,写作 $g(x, \theta) = \text{FOS}(x, \theta) - 1$, x 与 θ 分别表示降雨参数与公路边坡土体参数。为求解公路边坡安全系数,首先建立该公路边坡的有限元模型,如图 3 (b) 所示。该模型采用三角形网格,网格尺寸为 1 m。两侧与底部设置为不排水边界,坡面设置流量边界,模拟降雨入渗。不考虑坡面积水,即坡面孔隙水压力不高于 0。根据 Richard 方程与质量守恒原理,降雨入渗非饱和土的二维渗流控制方程,写作下式:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (16)$$

式中: x 与 y 为坐标, K 为土体渗透系数, h 为总水头, q 为降雨入渗流量, θ_w 为体积含水率, t 为时间。总水头由位置水头与孔隙压力水头组成。孔隙水压力、土体渗透系数与体积含水率的关系,分别通过水土特征曲线与渗透方程,进行表征。采用 Van Genuchten (VG) 与 Hillel 模型^[26-27],水土特征曲线与渗透方程的表达式,分别如下:

$$\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + \left(\frac{\psi}{\alpha} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{-m} \quad (17)$$

$$K = K_s \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (18)$$

式中: θ_s 为饱和体积含水率, θ_r 为残余体积含水率, ψ 为基质吸力, K_s 为土体饱和渗透系数, α 、 m 为 VG 模型参数, η 为 Hillel 模型参数。根据 Bishop 有效应力原理,公路边坡抗剪强度 τ , 通过下式求得:

$$\tau = c' - \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} p_w \tan \varphi' + \sigma \tan \varphi' \quad (19)$$

式中: c' 为有效粘聚力, p_w 为孔隙水压力, φ' 为有效内摩擦角, σ 为土体应力。本案例中,土体参数有效内摩擦角 φ' 、饱和渗透系数 K_s 、VG 模型拟合参数 α 与 m 取值如表 2 所示;其他土体参数,包括 Hillel 模型参数 η 、饱和体积含水率 θ_s 、残余体积含水率 θ_r 、初始孔隙水压力、土体重度,取值如表 3 所示。利用 Geostudio 软件中的 SEEP/W 模块求解式 (16) - (18), 获得降雨入渗条件下边坡孔隙水压力。之后,利用 Geostudio 软件中的 SLOPE/W 模块,基于式 (19) 与 Morgenstern-Price 极限平衡法,计算公路边坡最危险滑动面的安全系数。

表 2 土体参数随机变量的均值与标准差

Table 2 Mean and standard deviation of random variables of soil parameters

土体参数随机变量	φ' / (°)	K_s / (m/s)	α / (kPa)	m
均值	40	1×10^{-5}	5	0.3
变异系数	0.05	0.3	0.2	0.5

表 3 确定性土体参数取值

Table 3 Deterministic values of soil parameters

确定性土体参数	η	θ_s	θ_r	初始孔隙压 / (kPa)	土体重度 / (kN·m ⁻³)
取值	3	0.3	0.09	-20	1750

3.2 降雨条件下公路边坡受损概率分析

对降雨参数与公路边坡土体参数,即 x 与 θ 的概率分布进行建模。降雨基于强度与历时进行表征。令 x_q 和 x_t 分别表示降雨强度与降雨历时。由于 x_q 和 x_t 通常为负相关,采用 Frank Copula 函数拟合其联合累计概率函数 $F(x = x_q, x_t)$ ^[25], 公式如下:

$$F(x) = -\frac{1}{\delta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\delta F(x_q)} - 1)(e^{-\delta F(x_t)} - 1)}{e^{-\delta} - 1} \right] \quad (20)$$

式中： δ 为相关性参数， $F(x_q)$ 与 $F(x_t)$ 分别为降雨强度与历时的边缘累计密度函数，基于广义帕累托函数构建^[21]， $F(x = x_q \text{ 或 } x_t)$ 写作下式：

$$F(x) = 1 - \left(1 + \gamma \frac{x - \mu}{\varepsilon}\right)^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (21)$$

式中： μ 、 ε 、 γ 分别为位置、尺度、形状参数。为标定上述降雨概率分布，需要收集新加坡地区的历史降雨数据。为减少工作量，本案例直接采用文^[25]的标定结果，降雨概率分布参数如表4所示。图4展示了新加坡地区降雨强度与历时分布直方图。可以看到，强度越大、历时越长的降雨事件，出现概率越低。

将土体参数中的有效内摩擦角 φ' 、饱和渗透系数 K_s 、VG模型拟合参数 α 与 m 考虑为服从对数正态分布的随机变量 θ 。参考Nordsiek等^[28]， α 与 m 的相关系数取0.8，其他变量相互独立。土体参数随机变量的均值与变异系数如表2所示。根据式(9)，采用蒙特卡洛法，对降雨诱发公路边坡受损概率 p_f 进行离散求解。样本数量取1000，计算得到该公路边坡的受损概率 p_f 为0.18。根据式(10)， p_f 估计误差等于0.086。应该指出，该边坡受损概率偏大，这主要是由于未考虑工程加固措施。

表4 新加坡降雨强度-历时联合分布参数

Table 4 Joint distribution parameters of intensity and duration of rainfall in Singapore

分布参数	广义帕累托分布		Frank Copula
	$x_q / (\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$x_t / (\text{h})$	
γ	0.07	-0.02	
μ	5.08	0.90	
ε	0.98	2.92	
δ			-1.19

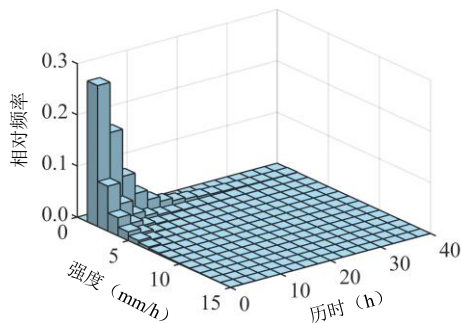


图4 新加坡地区降雨强度与历时分布直方图

Fig. 4 Histograms of intensity and duration of rainfall in Singapore

3.3 受损公路边坡功能损失与恢复时间概率预测

前文将公路边坡功能定义为交通运输能力，而交通运输能力与车道数密切相关。如图5所示，车道被滑体堵塞越多，公路边坡功能损失越高。

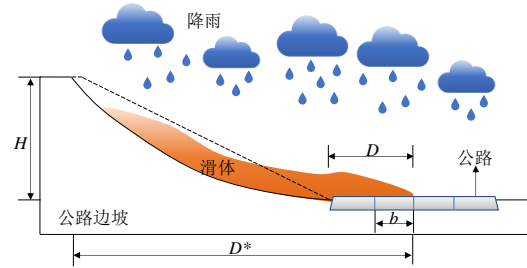


图5 降雨诱发滑坡阻塞公路

Fig. 5 Highway blocked by the rainfall-induced landslide

令 D 表示滑体最远端与初始坡脚的水平距离， b 表示单车道宽度， n_h 表示车道数。失稳条件下公路边坡功能损失 $Q_i(D)$ ，采用下式计算：

$$Q_i(D) = \begin{cases} \lceil D/b \rceil / n_h & D/b < n_h \\ 1 & D/b \geq n_h \end{cases} \quad (22)$$

式中： $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。采用经验法对滑体运动距离进行预测。文^[29]建立了降雨型滑坡运动距离经验预测模型，公式如下：

$$\lg D^* = 1.28 \lg H - 0.27 + \xi \quad (23)$$

式中： \lg 表示以10为底的对数， D^* 表示滑体初始后源与滑体最远端的水平距离， H 表示滑体初始后源距离地面的垂直高度， ξ 表示预测模型误差，服从均值为0，标准差为0.3的正态分布。

根据图3，取滑坡高度 H 为10 m，代入式(23)，结合误差分布，求得 D^* 的概率分布，如图6(a)所示。可以看到， D^* 的最可能取值为6.57 m。将 D^* 转化为 D ，求得 D 的概率密度函数 $f(D)$ 。根据 $f(D)$ 与式(22)，估算得到失稳条件下公路边坡功能损失及其发生概率，如图6(b)所示。公路边坡功能损失为0、0.25、0.5、0.75、1的累计发生概率分别等于0.49、0.18、0.12、0.07、0.14，失稳条件下公路边坡功能遭受损失与未遭受损失的概率大致相同。

参考文^[16]，采用三角分布表征受损公路边坡恢复时间 Δt 的不确定性，公式如下：

$$f(\Delta t) = \begin{cases} \frac{2(\Delta t - \Delta t_{\min})}{(\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min})(\Delta t_m - \Delta t_{\min})} & \Delta t_{\min} \leq \Delta t \leq \Delta t_m \\ \frac{2(\Delta t_{\max} - \Delta t)}{(\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min})(\Delta t_{\max} - \Delta t_m)} & \Delta t_m \leq \Delta t \leq \Delta t_{\max} \end{cases} \quad (24)$$

式中： Δt_{\min} 、 Δt_m 、 Δt_{\max} 分别为公路边坡恢复时间的下限、众数、上限。参考文献^[30]，分别取 Δt_{\min} 、 Δt_m 、 Δt_{\max} 为24天、30天、36天，代入式(24)，恢复时间概率分布如图6(c)所示。

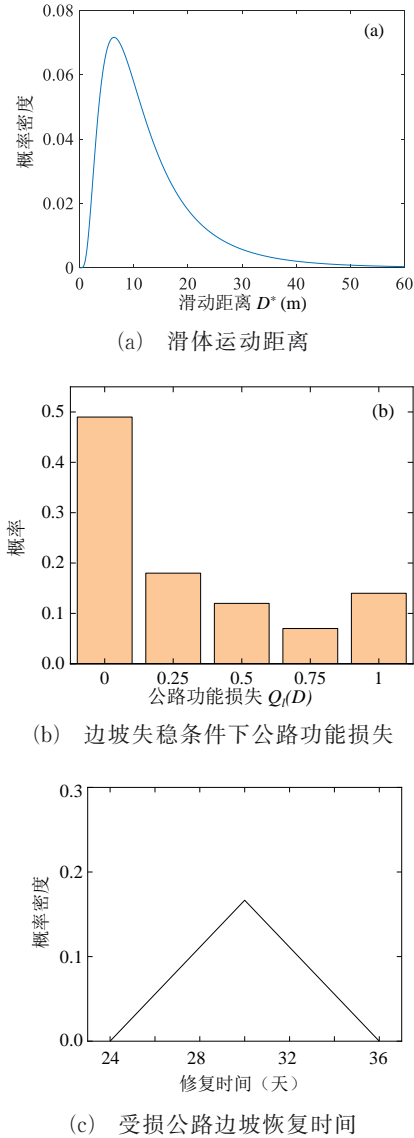


图6 公路边坡破坏与恢复概率分布

Fig. 6 Probability distributions of damage and recovery of the highway slope

3.4 降雨条件下公路边坡韧性指标计算

采用式(11)，求得失稳条件下公路边坡功能损失期望值 $E_{Ql} = 0 \times 0.49 + 0.25 \times 0.18 + 0.5 \times 0.12 + 0.75 \times 0.07 + 1 \times 0.14 = 0.30$ 。根据式(24)与式(12)，求得公路边坡恢复时间期望值 $E_{\Delta t} = 30$ 天。利用式(13)，单场降雨事件下公路边

坡功能累计损失期望值 $E_{Al} = p_f E_{Ql} E_{\Delta t} = 1.62$ 天。

新加坡地区一年内平均降雨事件数为38场，取 $T = 1, n_T = 38$ 。假设不同降雨事件下公路边坡的功能损失相同，利用式(14)，一年内38场降雨事件下公路边坡功能累计损失期望值 $E_{AIT} = n_T E_{Al} = 61.56$ 天。最终基于式(15)，求得降雨条件下公路边坡韧性指标 $\gamma_{Re} = 0.96$ 。图7进一步分析了公路边坡韧性指标分别随受损概率、功能损失期望值、恢复时间期望值的变化情况。

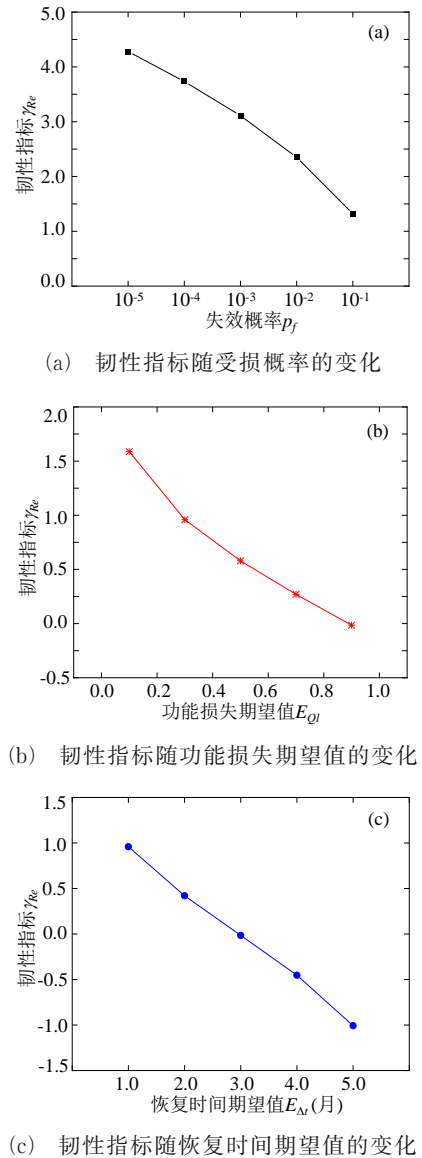


图7 参数敏感性分析

Fig. 7 Parameter sensitivity analysis

可以看到，公路边坡韧性指标与受损概率、功能损失期望值、恢复时间期望值均呈负相关关系。当受损概率从 10^{-5} 增加至 10^{-1} ，公路边坡韧性指标

从4.28降至1.31。当功能损失期望值从接近于0增加至0.90,公路边坡韧性指标从1.58降至-0.01。当恢复时间期望值从1个月增加至5个月,公路边坡韧性指标从0.96降至-1.00。总体而言,公路边坡韧性随受损概率、功能损失、恢复时间均发生显著变化,其中随受损概率的变化幅度最大。因此,采用本文提出的方法开展韧性评估时,应首先保证受损概率的计算精度,其蒙特卡洛模拟精度可基于式(10)进行评估。根据式(9),受损概率还受到自然灾害下基础设施功能函数模型、自然灾害强度概率模型、基础设施参数概率模型影响,所以需根据可靠数据构建上述模型。

4 结 论

(1) 考虑自然灾害强度与基础设施参数不确定性,量化基础设施功能累计损失期望值,基于概率积分变换,定义了能够有效区分不同基础设施安全水平的韧性指标,为自然灾害下基础设施韧性防护提供有效工具。

(2) 通过构建受损状态函数,分析自然灾害下基础设施受损概率,分别估算受损条件下基础设施功能累计损失期望值与受损基础设施恢复时间期望值,提出了基础设施韧性高效计算方法,方便工程应用。

(3) 通过案例分析,研究了降雨条件下公路边坡韧性,发现受损概率、功能损失、恢复时间均显著影响公路边坡韧性,其中受损概率的影响最大。

参考文献:

- [1] 陈祖煜,程耿东,杨春和.关于我国重大基础设施工程安全相关科研工作的思考[J].土木工程学报,2016,49(03):1-5.
Chen Zuyu Cheng Gengdong, Yang Chunhe. Research work on construction safety of major infrastructures in China: overview and a forward look[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(03): 1-5. (in Chinese)
- [2] 张洁,庄一豪,陆盟.降雨诱发公路滑坡社会风险评估[J].防灾减灾工程学报,2023,43(03):413-422+473.
Zhang Jie, Zhuang Yihao, Lu Meng. Assessing Societal Risk of Rainfall-induced Landslides along Highways [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering. 2023, 43(03): 413-422+473. (in Chinese)
- [3] Madni A M, Jackson S. Towards a conceptual framework for resilience engineering[J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(2): 181-191.
- [4] 郑刚,程雪松,周海祚,等.岩土与地下工程结构韧性评价与控制[J].土木工程学报,2022,55(07):1-38.
Zheng Gang, Cheng Xuesong, Zhou Haizuo, et al. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(07): 1-38. (in Chinese)
- [5] Hosseini S, Barker K, Ramirez-Marquez J E. A review of definitions and measures of system resilience[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 145: 47-61.
- [6] Rajani B, Kleiner Y. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models [J]. Urban Water, 2001, 3(3): 151-164.
- [7] Yang Y, Ng S T, Zhou S, et al. Physics-based resilience assessment of interdependent civil infrastructure systems with condition-varying components: A case with stormwater drainage system and road transport system [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 54: 101886.
- [8] Cassottana B, Shen L, Tang L C. Modeling the recovery process: A key dimension of resilience[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 190: 106528.
- [9] Liu W, Shan M, Zhang S, et al. Resilience in infrastructure systems: A comprehensive review [J]. Buildings, 2022, 12(6): 759.
- [10] Osei-Kyei R, Almeida L M, Ampratwum G, et al. Systematic review of critical infrastructure resilience indicators [J]. Construction Innovation, 2022, 23 (5) : 1210-1231.
- [11] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [12] Janic M. Modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 71: 1-16.
- [13] Dong Y, Frangopol D M. Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties [J]. Engineering Structures, 2015, 83: 198-208.
- [14] Huang Z, Cheng Y, Zhang D, et al. Seismic fragility and resilience assessment of shallowly buried large-section underground civil defense structure in soft soils: Framework and application [J]. Tunnelling and Under-

- ground Space Technology, 2024, 146: 105640.
- [15] Zhang J, Ma X, Lu M, et al. Assessing highway resilience subjected to rainfall-induced slope failure [J]. Computers and Geotechnics, 2025, 181: 107134.
- [16] Deco A, Bocchini P, Frangopol D M. A probabilistic approach for the prediction of seismic resilience of bridges[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(10): 1469-1487.
- [17] Ouyang M, Duenas-Osorio L, Min X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. Structural Safety, 2012, 36: 23-31.
- [18] Ayyub B M. Systems resilience for multihazard environments: Definition, metrics, and valuation for decision making[J]. Risk Analysis, 2014, 34(2): 340-355.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程结构可靠性设计统一标准: GB 50068-2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of engineering structures: GB 50068-2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [20] Nowak A S, Collins K R. Reliability of Structures (2nd Ed.)[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [21] H-SAng A, Tang W H. Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications in Civil & Environmental Engineering (2nd Ed.) [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [22] 陈祖煜. 建立在相对安全率准则基础上的岩土工程可靠度分析与安全判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(03): 521-544.
Chen Zuyu. Reliability analysis and safety criterion in geotechnical engineering based on the index of safety margin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(03): 521-544. (in Chinese)
- [23] Melchers R E, Beck A T. Structural Reliability Analysis and Prediction (3rd Ed.) [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.
- [24] JCSS. Probabilistic Model Code [S]. Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001.
- [25] Jun C, Qin X, Gan T Y, et al. Bivariate frequency analysis of rainfall intensity and duration for urban stormwater infrastructure design[J]. Journal of Hydrology, 2017, 553: 374-383.
- [26] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [M]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [27] Hillel D. Soil and water: physical principles and processes[M]. Netherlands: Elsevier, 2012.
- [28] Nordsiek S, Diamantopoulos E, Hoerdt A, et al. Relationships between soil hydraulic parameters and induced polarization spectra [J]. Near Surface Geophysics, 2016, 14(1): 23-37.
- [29] 吴晨光, 陆盟, 张洁, 等. 降雨型滑坡运动距离概率预测模型[J]. 工程地质学报, 2019, 27(s1): 164-171.
Wu Chenguang, Lu Meng, Zhang Jie, et al. Probabilistic prediction of rain-induced landslide travel distance [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(s1): 164-171. (in Chinese)
- [30] Lu M, Tao Y, Ma X, et al. Probabilistic framework for resilience assessment of soil slopes against rainfall infiltration [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84: 349.