

蒋礼果,黄淑萍. 2022. 区域公路网震后连通可靠性分析及系统功能恢复[J]. 地震研究, 45(3): 370–378, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0036.

Jiang L G, Huang S P. 2022. Connectivity reliability analysis and system function recovery of post-earthquake regional highway network [J]. *Journal of Seismological Research*, 45(3): 370–378, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0036.

## 区域公路网震后连通可靠性分析及系统功能恢复\*

蒋礼果, 黄淑萍\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 为了研究区域公路网震后的连通功能, 将连通可靠性作为评价指标, 采用经验预测方法计算得到公路单元的抗震可靠性, 使用事件树和成功树确定贝叶斯网络结构和条件概率表, 然后将公路单元的抗震可靠性作为贝叶斯网络的先验概率输入, 构建区域公路网连通可靠性分析模型。结合贝叶斯网络的敏感度分析和更新能力, 提出一种启发式方法以识别关键单元的修复优先级, 为路网系统连通功能恢复提供依据。以2008年汶川 $M_s8.0$ 地震中G213和S9构成的区域公路网为研究对象, 对该方法进行了实例应用, 结果表明: 提出的模型可建立起公路网结构破坏和系统连通功能之间的联系, 启发式方法识别出的关键单元及其修复次序能够快速恢复区域公路网的连通可靠性。

**关键词:** 区域公路网; 连通可靠性; 贝叶斯网络; 公路单元; 系统功能恢复; 汶川地震

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2022)03-0370-09

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0036

### 0 引言

公路是生命线工程的组成部分, 也是抗震救灾的重要保障。一旦强震来袭, 公路网的局部结构破坏可能会导致公路中断, 甚至是路网系统的瘫痪, 阻碍人员疏散和物资运输(李廷辉等, 2021)。所以, 对局部结构破坏引起的区域公路网连通功能损失的分析在震后抢险救灾中至关重要。连通可靠性是评价系统连通功能的重要指标, 表示两节点间连通的概率, 其连通状态为连通或中断(Mine, Kawai, 1982)。一些学者将连通可靠性用于城市路网的抗震分析, 重点研究倒塌建筑产生的瓦砾阻塞量以及受损的桥梁对路网功能的影响。李健等(2017)基于综合瓦砾阻塞量计算路段的通行概率, 并以此评价上海豫园区域路网中路段的连通可靠性。何祥等(2016)从瓦砾阻塞量和桥梁震害方面计算道路连通概率, 并以连

通概率确定城市道路的剩余通行能力, 从而构建震害下交通系统的级联失效模型。Tang和Huang(2019)根据瓦砾阻塞量和桥梁震害经验预测路段的连通概率, 对城市路网进行抗震脆弱性评价。也有学者将连通可靠性用于乡村路网的抗震分析, 关注点主要为地震及其引起的次生灾害对路网功能的影响(Aydin *et al.*, 2018)。2008年汶川 $M_s8.0$ 地震震后调查发现, 区域公路网覆盖范围广, 路基路面破坏、桥梁毁坏、隧道坍塌、边坡崩滑是其主要震害形式, 也是影响路网连通可靠性的主要因素(李英民等, 2009; 王明文等, 2012), 这不同于城市沿街建筑物倒塌导致的道路阻塞。因此, 有必要根据路段、桥梁、隧道和边坡的破坏对区域公路网震后连通可靠性进行分析。

交通网络系统的防震减灾工作包括3个阶段: 震前防御阶段、震后应急阶段和震后中长期修复阶段(Bensi, 2010)。其中地震应急阶段的策略是最重要和最直接地降低震害损失和恢复系统功能

\* 收稿日期: 2021-12-04.

基金项目: 国家自然科学基金(51978397)资助.

第一作者简介: 蒋礼果(1996-), 硕士研究生, 主要从事路网连通可靠性研究. E-mail: xiaoguozi@sjtu.edu.cn.

✉ 通讯作者简介: 黄淑萍(1973-), 副教授, 主要从事系统可靠性和韧性研究. E-mail: sphuang@sjtu.edu.cn.

的方式，遵循“识别－评估－修复”的顺序，即检测路网的实际震害状况，分析路网的功能损失情况，制定相应的修复策略（邓亚娟等，2009）。在有限资源条件下，短期内不可能修复所有的受损设施，因此修复策略的重点在于确定单元修复次序（杨静等，2019）。考虑到地震发生的不确定性和震害形式的多样性，本文采用经验预测方法计算公路单元的通行概率，通过贝叶斯网络分析，建立适合区域公路网震后连通可靠性的分析模型，并结合敏感度分析和贝叶斯更新，识别区域公路网的关键单元修复优先级，为震后系统功能恢复提供依据。

1 公路单元的抗震可靠性

目前，公路单元的震害预测方法包括结构可靠性分析和震害经验统计。结构可靠性分析侧重于单个结构物的震害预测，建模复杂（孙海，高惠瑛，2017）。震害经验统计法是根据历史资料和大量震害样本进行的统计回归分析，预测结果随样本量的增加而更加可靠，适用于具有相同结构特征的单元群体的震害预测（杨翰雯，欧进萍，2019）。本文引入通行概率量化公路单元的抗震可靠性，通行概率是指公路设施不被地震破坏而能使车辆保持通行的可能性。考虑到区域公路网单元数量多且结构复杂，采用震害经验预测法计算路段单元、桥梁单元、隧道单元和边坡单元的通行概率。

1.1 路段单元

本文采用李永义（2014）提出的震害经验预测方法计算路段单元的通行概率，该方法给出了地震烈度、路基土和场地类别等7个震害影响因素的量化值（表1）以及路段单元的震害指数的经验算式：

$$\beta_i = 0.2 \left[ \sum_{j=1}^7 x_{ij} \right] - 0.1 \tag{1}$$

式中： $x_{ij}$ 是第*i*个路段单元的第*j*个震害因素的量化值； $\beta_i$ 是路段单元的震害指数。

道路的破坏程度一般为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏5个等级，对应的震后道路通行状态为允许通行、限制通行和禁止通行。

表1 路段单元的震害因素量化值  
Tab. 1 Quantitative values of seismic damage factors for road units

震害因素	类别	量化值 $x_{ij}$
地震烈度	6	0.20
	7	1.00
	8	1.05
	9	1.15
	10	1.20
路基土	坚硬土	0.90
	黏土	1.00
	粉土、细沙土	1.10
	分期施工	1.20
场地类型	I	0.80
	II	1.00
	III	1.10
	IV	1.30
地基失效程度	无	1.00
	轻	1.05
	中	1.15
	重	1.40
路基类型	低矮路基	1.00
	陆堤路堑	1.10
	填挖组合	1.30
	沿河路基	1.35
路基高差 $H_1/\text{m}$	$H_1 \leq 1$	1.00
	$1 < H_1 \leq 2$	1.05
	$2 < H_1 \leq 3$	1.10
	$H_1 > 3$	1.40
设防烈度	已设防	0.90
	未设防	1.00
	已有损坏	1.20

在允许通行和限制通行状态下，道路的破坏程度越高、其通行概率越低；在禁止通行状态下，道路的通行概率为0。震后道路通行概率  $P_r$  与道路震害指数  $\beta_i$  之间的关系为：

$$P_r = 1 - \beta_i \tag{2}$$

结合表1、式（1）和式（2），可以计算出路段单元的震害指数  $\beta_i$ 。然后根据表2判断  $\beta_i$  所属区间，从而确定路段单元的震害程度和对应的通行概率。

表 2 路段单元的通行概率  
Tab. 2 Passing probability of road units

路段震害指数 $\beta_i$	震害程度	通行状态	通行概率
$0 \leq \beta_i \leq 0.2$	基本完好	允许通行	$1 \leq P_r \leq 0.8$
$0.2 < \beta_i \leq 0.4$	轻微破坏	限制通行	$0.6 \leq P_r < 0.8$
$0.4 < \beta_i \leq 0.6$	中等破坏	限制通行	$0.4 \leq P_r < 0.6$
$0.6 < \beta_i \leq 0.8$	严重破坏	禁止通行	0
$0.8 < \beta_i \leq 1$	完全破坏	禁止通行	0

### 1.2 桥梁单元

本文使用朱美珍 (1994) 提出的桥梁震害经验预测方法计算桥梁单元的通行概率, 该方法总

表 3 桥梁单元的震害因素系数值

Tab. 3 Coefficients of seismic damage factors for bridge units

震害因素	类别	系数值 $W_{jk}$	震害因素	类别	系数值 $W_{jk}$
地震烈度	Ⅶ度	1.00	支座形式	有防落梁措施	0.70
	Ⅷ度	1.10		橡胶消能支座	1.00
	Ⅸ度	1.20		一般支座	1.10
	Ⅹ度	1.30	墩台高度 $H_2/\text{m}$	$H_2 < 5$	1.00
场地土分类	I 类	0.80		$5 \leq H_2 \leq 10$	1.10
	II 类	1.00		$H_2 > 10$	1.20
	III 类	1.50	墩台材料	钢筋混凝土	1.05
	IV 类	1.80		砖、石	1.10
地基失效程度 (液化、边坡失稳)	无	1.00	基础形式	扩大基础、沉井基础、多排桩基础	1.00
	轻	1.50		排架桩、高桩承台	1.20
	重	1.80	桥梁长度/m	跨度 $\leq 3$ , 跨长 $\leq 10$	1.00
上部结构	刚架、单拱	1.00		跨度 $> 3$ , 跨长 $> 10$	1.20
	连续梁、连孔拱	1.10	$W_0$		0.85
	简支梁、悬臂梁	1.40			

表 4 桥梁单元的通行概率  
Tab. 4 Passing probability of bridge units

桥梁震害指数 $A$	震害程度	通行概率
$A \leq 1.23$	基本完好	1
$1.23 < A \leq 2.20$	轻微破坏	0.8
$2.20 < A \leq 3.38$	中等破坏	0.6
$3.38 < A \leq 4.40$	严重破坏	0.1
$A > 4.40$	完全损毁	0

### 1.3 隧道单元

本文采用 Fang 等 (2008) 提出的震害经验预测方法计算隧道单元通行概率, 该方法给出 7 种隧道震害影响因素的量化值 (表 5), 隧道的震害经

结了 9 类震害因素的系数值 (表 3), 并给出公路桥梁震害预测的经验算式:

$$A = W_0 \prod_{j=1}^9 \prod_{k=1}^4 W_{jk}^{\delta_{jk}} \quad (3)$$

式中:  $A$  是桥梁单元的震害指数;  $W_0$  是计算系数, 取值为 0.85;  $W_{jk}$  是第  $j$  项震害因素中第  $k$  类的加权系数值 (表 3);  $\delta_{jk}$  是观测系数; 当第  $j$  项震害因子中有第  $k$  类因素时  $\delta_{jk} = 1$ , 否则  $\delta_{jk} = 0$ 。

结合表 3 和式 (3), 可以计算出桥梁的震害指数  $A$ ; 然后, 根据表 4 (李英民等, 2009) 判断  $A$  所属区间, 从而确定桥梁单元的震害程度以及对应的通行概率。

验预测算式为:

$$y = \sum_{j=1}^7 \sum_k^{r_i} \delta_{jk} b_{jk} \quad (4)$$

式中:  $y$  是隧道单元的震害指数, 当  $y \leq 0$  时, 取  $y = 0$ , 当  $y > 1$  时, 取  $y = 1$ ;  $b_{jk}$  是第  $j$  项震害因子中第  $k$  类的计算系数值 (表 5);  $\delta_{jk}$  是观测系数, 当第  $j$  项震害因子中有第  $k$  类因素时,  $\delta_{jk} = 1$ , 否则  $\delta_{jk} = 0$ 。

根据式 (4) 和表 5, 可以计算出隧道单元的震害指数  $y$ ; 然后, 通过表 6 (李英民等, 2009) 判断  $y$  所属区间, 从而确定隧道单元的震害程度及其对应的通行概率。

表 5 隧道单元的震害因素系数值

Tab. 5 Coefficients of seismic damage factors for tunnel units

震害因素	类别	计算系数 $b_{jk}$
地震烈度	Ⅵ度	-0.05
	Ⅶ度	0
	Ⅷ度	0.05
	Ⅸ度	0.2
	X度	0.3
覆盖层厚度 $h/\text{m}$	$h \leq 10$	0.12
	$10 < h \leq 50$	0.05
	$h > 50$	0.01
围岩类型	软质岩	0.07
	硬质岩	0
是否通过断层	是	0.25
	否	0
长度 $l/\text{m}$	$l \leq 1\ 000$	0
	$l > 1\ 000$	0.08
修建时间及设防等级	1978 年以前	0.05
	1978 年以后不设防	0
	1978 年以后Ⅵ度设防	-0.05
	1978 年以后Ⅶ度设防	-0.1
	1978 年以后Ⅷ度设防	-0.15
	1978 年以后Ⅸ度设防	-0.2
	1978 年以后X度设防	-0.25
洞口稳定性	好	0
	较差	0.15
	很差	0.3

表 6 隧道单元的通行概率

Tab. 6 Passing probability of tunnel units

隧道震害指数 $y$	震害程度	通行概率
$0 \leq y \leq 0.2$	基本完好	1
$0.2 < y \leq 0.4$	轻微破坏	0.8
$0.4 < y \leq 0.6$	中等破坏	0.6
$0.6 < y \leq 0.8$	严重破坏	0.1
$0.8 < y \leq 1.0$	完全损毁	0

1.4 边坡单元

本文使用王余庆等（2001）提出的边坡震害经验预测的方法计算边坡单元通行概率，该方法综合考虑地质、坡角、坡高、降水强度和地震烈度 5 个主要震害因素，对各因子分级赋值（表 7），边坡震害的经验算式为：

$$H = (S \times S_a \times S_h) (T_s + T_p) \tag{5}$$

式中： $H$  是边坡的震害指数； $S$  是地质条件， $S = S_1 \times S_2$ ； $S_a$  是坡角； $S_h$  是坡高； $T_s$  是地震烈度； $T_p$  是降雨强度。

表 7 边坡单元的震害因素赋值

Tab. 7 Valuation of seismic damage factors for slope units

震害因素	类别	赋值
$S_1$	岩石坚硬，结构完整	1
	岩石较坚硬，结构较完整	2
	岩石较破碎，结构不完整	3
	岩石破碎，岩土体不完整	4
	岩石特别破碎，岩土体特别不完整，有易滑地层	5
$S_2$	新构造运动微弱，未发生过 6 级以上地震，只有少量小型断裂	1
	新构造运动不强烈，发生过 6 级以上地震，只有小型断裂	2
	新构造运动较强烈，发生过 6 级以上地震，有主干断裂	3
	新构造运动强烈，发生过 7 级以上地震，大型断裂带，断裂较密集	4
	新构造运动特别强烈，发生过多次 7 级以上地震，巨大断裂带，断裂较密集	5
$S_a/(\text{°})$	$S_a \leq 10$	1
	$10 < S_a \leq 20$	2
	$20 < S_a \leq 30$	3
	$30 < S_a \leq 40$	4
	$S_a > 40$	5
$S_h/\text{m}$	0 ~ 75	1
	76 ~ 175	2
	176 ~ 300	3
	301 ~ 500	4
	> 500	5
$T_s$	$\leq \text{V}$ 度	1
	Ⅵ度	2
	Ⅶ度	3
	Ⅷ度	4
	$\geq \text{IX}$ 度	5
$T_p$	年降雨量 < 400 mm，且分布均匀	1
	年降雨量 400 ~ 800 mm，且分布均匀	2
	年降雨量 > 800 mm	3
	年降雨量 > 800 mm，且暴雨较多	4
	年降雨量 > 800 mm，且暴雨频发	5

表 8 边坡单元的通行概率

Tab. 8 Passing probability of slope units

边坡震害指数 $H$	稳定程度	通行概率
$H < 630$	稳定	1
$630 \leq H \leq 900$	可能失稳	0.6
$H > 900$	失稳	0

## 2 区域公路网连通可靠性分析模型

### 2.1 贝叶斯网络构建

区域公路网是一个复杂的物理网络系统，再加上地震发生的不确定性，因此区域公路网震后连通可靠性的分析较为复杂。贝叶斯网络作为一种概率图模型，既可以根据条件概率关系整合不确定性变量之间的联系，也能基于实时的观测信息和专家意见动态评估系统功能，是处理不确定性问题的有效工具（Kabir, Papadopoulos, 2019）。故本文将其应用于区域公路网震后连通可靠性分析模型的构建，具体的建模过程有 3 个步骤：

#### （1）事件树分析

分析区域公路网震后连通可靠性之前，需要明确公路单元、公路段、路径和 OD（Origin - Destination）之间的连通逻辑。事件树是一种可以将系统事故与导致事故原因之间的逻辑关系用树形图表示的分析方法，区域公路网震后连通的事件树如图 1 所示。在该事件树中，当一条公路段上所有单元连通时，那么该条公路段是连通的；当一条路径上的所有公路段都连通时，该条路径才连通；而当一对 OD 的所有路径中有一条是连通的，那么此 OD 是连通的。

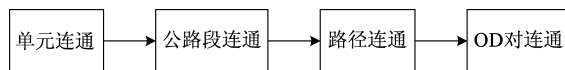


图 1 公路网连通的事件树

Fig. 1 Event tree of highway network connectivity

#### （2）成功树构建

成功树可以依据成功事件的发生概率以及事件之间的逻辑关系计算顶事件成功的概率。先通过网络分析确定公路单元、公路段、路径和 OD 对之间的构成关系，然后根据事件树分析得到它们

之间连通逻辑，构建区域公路网对应的成功树，如图 2 所示。OD 连通是顶事件，公路段连通和路径连通是叶节点事件，公路单元连通是底事件。每个事件都有两个状态：连通状态用 1 表示，中断状态用 0 表示。公路单元、公路段、路径、OD 之间的连通关系用与或门（AND - OR）表示，其中与门（AND Gate）是指与某个父节点事件相连的所有子节点事件都发生时，该父节点事件才发生。或门（OR Gate）是指与某个父节点事件相连的子节点事件中，只要有一个发生，那么父节点事件就会发生。

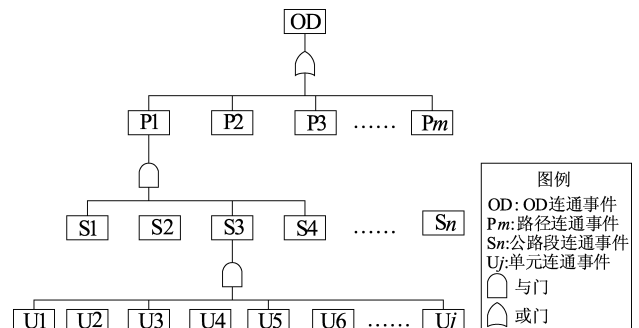


图 2 公路网连通的成功树

Fig. 2 Success tree for highway network connectivity

#### （3）成功树转化为贝叶斯网络

贝叶斯网络所需参数为根节点的概率分布和其它节点的条件概率分布。成功树转化为贝叶斯网络有以下步骤：首先将成功树中的事件与贝叶斯网络中的节点一一对应，重复的事件合并为贝叶斯网络中的一个节点。然后，将输入事件对应的节点通过有向弧连接到逻辑门对应输出事件的节点，并把成功树中的与门和或门转化为贝叶斯网络中节点的条件概率表，如图 3 所示，若  $E$  和  $T$  为 1，表示事件发生； $E$  和  $T$  为 0，则表示事件不发生。

通过上述步骤可以得到区域公路网对应的贝叶斯网络，然后将公路单元的抗震可靠性作为贝叶斯网络的先验概率，计算分析区域公路网震后的连通可靠性。

### 2.2 基于贝叶斯更新的系统功能恢复

本文系统功能的修复策略表现为关键单元及其修复优先级的识别。关键单元是指那些抗震可靠性发生轻微变化时，关联的 OD 对连通可靠性发生最大变化的单元。Kjærulff 和 Gaag（2000）提出

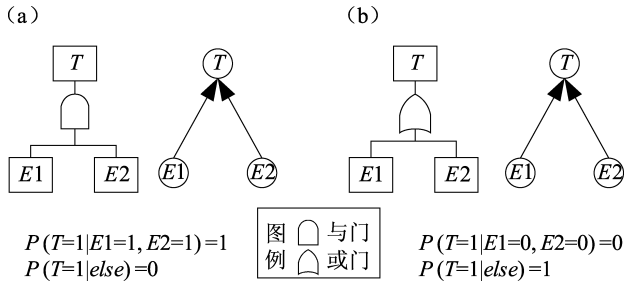


图3 与门 (a) 和或门 (b) 对应的贝叶斯网络

Fig. 3 Bayesian network corresponding to AND gate (a) and OR gate (b)

的贝叶斯网络下的敏感度分析被用于识别关键单元，其中贝叶斯网络下 OD 节点的连通可靠性表示为：

$$P = \frac{aU + b}{cU + d} \quad (6)$$

式中： $P$  是贝叶斯网络中 OD 节点的连通可靠性； $U$  ( $0 < U < 1$ ) 是单元节点的抗震可靠性； $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  是计算系数。根据关键单元的定义，可以得到敏感度系数  $S$ ，即 OD 节点的连通可靠性  $P$  对单元节点抗震可靠性  $U$  的导数：

$$S = \frac{ad - bc}{(cU + d)^2} \quad (7)$$

当  $U = 0/1$  时，公路单元的状态为中断或连通，单元中断或连通是一个必然事件，此时单元的敏感系数为 0。敏感度分析中，具有最大敏感系数值的单元可以确定为该 OD 的关键单元，从而推断公路网在当前状态下的关键单元。

为快速修复震后公路网系统的连通可靠性，使用基于贝叶斯更新的启发式方法识别关键单元的修复优先级：①将公路单元抗震可靠性作为贝叶斯网络的先验概率，计算贝叶斯网络中各节点第  $i$  阶段（初始阶段为第 1 阶段）的连通可靠性；②采用敏感度分析识别第  $i$  阶段的关键单元；③修复步骤②中的关键单元至期望抗震可靠性  $ESR$  (Expected Seismic Reliability,  $0 \sim 1$ )；④将被修复单元的抗震可靠性作为新的概率输入，更新区域公路网震后连通可靠性分析模型，得到第  $i+1$  阶段的连通可靠性和关键单元；⑤重复步骤②~④，直到某一阶段识别出的关键单元的抗震可靠性满足期望抗震可靠性  $ESR$ 。

### 3 实例应用

本文研究对象是 2008 年汶川  $M_s 8.0$  地震中由 G213 和 S9 构成的区域公路网，该公路网位于都江堰市和银杏乡之间，途经震中映秀镇，如图 4 所示。

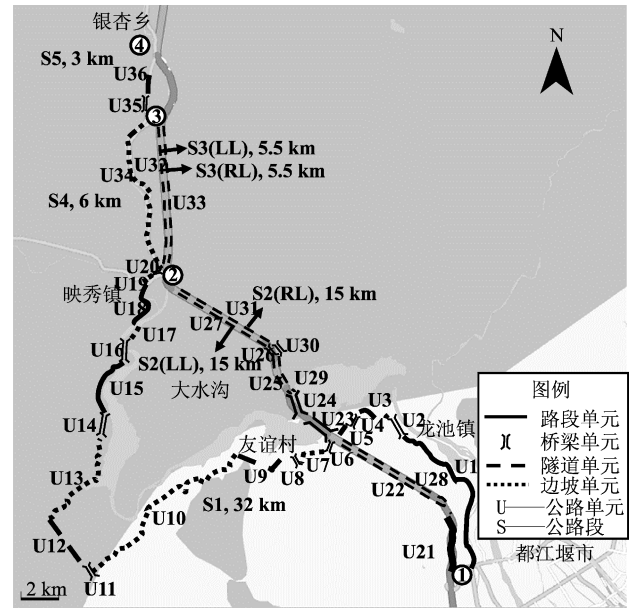


图4 由 G213 和 S9 构成的区域公路网

Fig. 4 Regional highway network consisting of G213 and S9

节点①、②和③是交叉口；节点①、②和④分别对应都江堰市、映秀镇和银杏乡的应急救援中心；公路段 S1 (①—②)、公路段 S4 (②—③) 和公路段 S5 (③—④) 位于 G213，公路段 S2 (①—②) 和公路段 S3 (②—③) 位于 S9。双线设计被纳入考虑，使用左线 LL 和右线 RL 区分相应的公路段。地震发生后，应急救援中心通常是抗震救灾运输任务的起点或终点，所以本文将节点①、②和④设置为应急救援任务的起点或终点，对应 O1D2, O2D1, O1D4, O4D1, O2D4 和 O4D2。公路单元震害数据来源于《汶川地震公路震害调查》(陈乐生, 2012)。根据公路单元通行概率的计算方法，可以得到公路单元的抗震可靠性，见表 9。

根据贝叶斯网络的构建方法，可以得到区域公路网对应的贝叶斯网络。当指向一个节点的父节点数量超过 3 时，中间节点 I1 ~ I14 加入到该网

表9 汶川地震中公路单元的通行概率  
Tab.9 Passing probability of highway units in the Wenchuan Earthquake region

公路单元	通行概率	公路单元	通行概率
U1 (路段单元)	0.842	U19 (隧道单元)	0.1
U2 (桥梁单元)	0.1	U20 (桥梁单元)	0.1
U3 (隧道单元)	0.6	U21 (路段单元)	0.842
U4 (桥梁单元)	0.6	U22 (隧道单元)	0.1
U5 (边坡单元)	0.6	U23 (桥梁单元)	0.6
U6 (桥梁单元)	0.1	U24 (桥梁单元)	0.1
U7 (边坡单元)	0.6	U25 (隧道单元)	0.1
U8 (桥梁单元)	0.1	U26 (桥梁单元)	0.1
U9 (隧道单元)	0.1	U27 (隧道单元)	0.1
U10 (边坡单元)	1	U28 (隧道单元)	0.1
U11 (桥梁单元)	0.1	U29 (隧道单元)	0.1
U12 (隧道单元)	0.1	U30 (桥梁单元)	0.6
U13 (边坡单元)	0.6	U31 (隧道单元)	0.1
U14 (桥梁单元)	0.6	U32 (隧道单元)	0.1
U15 (路段单元)	0.605	U33 (隧道单元)	0.1
U16 (桥梁单元)	0.1	U34 (边坡单元)	0
U17 (边坡单元)	0.6	U35 (桥梁单元)	0.1
U18 (路段单元)	0.756	U36 (隧道单元)	0.6

络模型,用以降低条件概率表的规模,实现贝叶斯网络的优化计算 (Kabir, Papadopoulos, 2019),最终的贝叶斯网络如图5所示。在贝叶斯网络中,一个有  $n$  个二态父节点的子节点的条件概率表的

规模为  $2^{n+1}$ , 如果一个数字存储需要8字节,共需要  $8 \times 2^{n+1}$ 字节的计算机存储空间。条件概率表的规模会随着父节点数量的增加呈指数级增长,这严重制约贝叶斯网络的计算效率。加入中间节点前后,本文贝叶斯网络的条件概率表所需存储空间分别为16 390.0625 KB和3.75 KB,所以中间节点能够极大降低计算机存储空间并在一定程度上提高计算效率。

将公路单元的抗震可靠性作为贝叶斯网络的先验概率输入,构建区域公路网连通可靠性分析模型。假设关键单元完全修复,即期望抗震可靠性  $ESR = 1$ , 被修复单元的抗震可靠性恢复至1;然后采用启发式方法,得到4个阶段公路段和OD的连通可靠性,如图6所示,以及各阶段的关键单元,见表10。图6a中,公路段S1和S4的连通可靠性无变化,原因在于各阶段被修复的关键单元不是其组成部分。公路段S2(LL)、S2(RL)、S3(LL)、S3(RL)和S5的连通可靠性有很大的改善,它们的连通可靠性在阶段4或之前已恢复至1。图6b中,所有OD的连通可靠性快速提升,在阶段4都达到了1,也就是恢复到了最佳连通状态。基于图6b中OD的连通可靠性,其恢复率可表示为:

$$r_i = \frac{P_{OD}^i - P_{OD}^{i-1}}{P_{OD}^{i-1}} \times 100\% \quad (8)$$

式中:  $r_i$  是第  $i$  阶段的OD对连通可靠性的恢复率;  $P_{OD}^i$  是第  $i$  阶段OD对的连通可靠性。

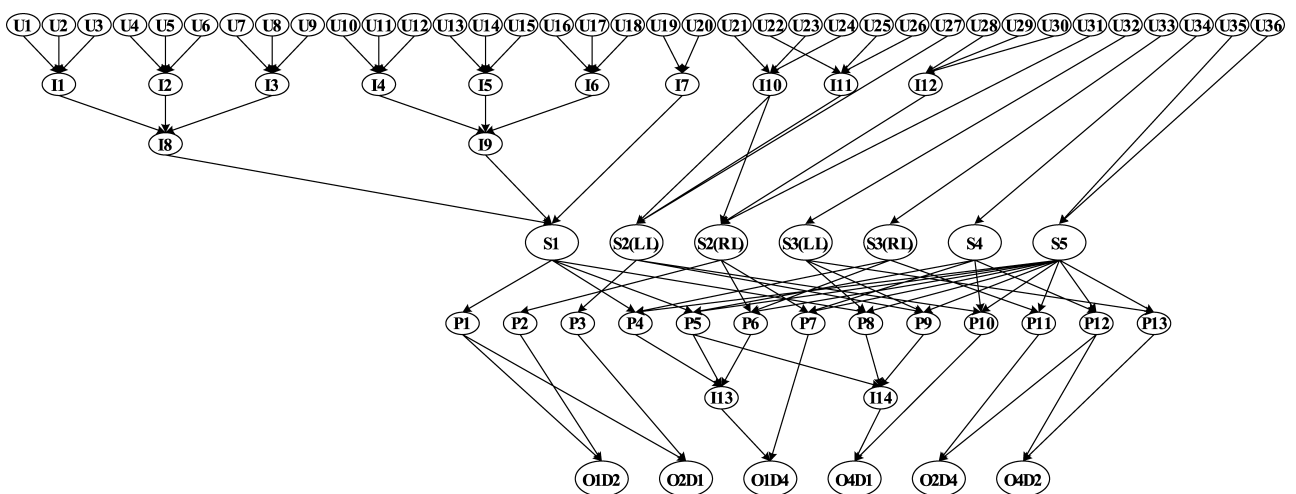


图5 公路网的贝叶斯网络模型

Fig.5 Bayesian network model of the highway network

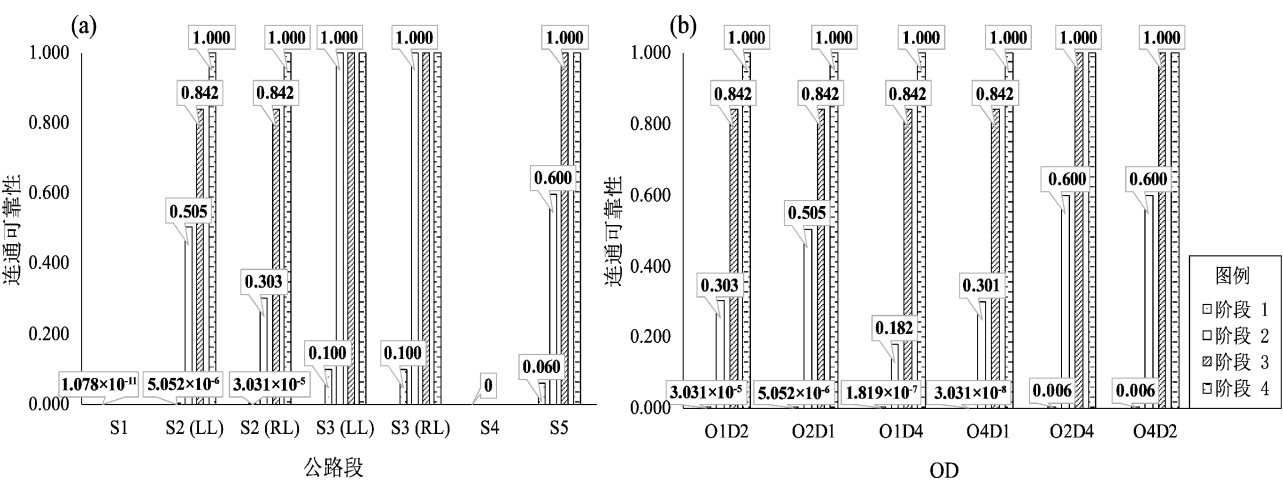


图 6 各阶段公路段 (a) 和 OD (b) 的连通可靠性

Fig. 6 Connectivity reliability of highway segments (a) and OD pairs (b) in each stage

表 10 各阶段的关键单元

Tab. 10 Critical units in each period

阶段	关键单元
1	U22, U24, U25, U26, U27, U28, U29, U31, U32, U33, U35
2	U23, U30, U36
3	U21

在表 11 中，阶段 2 的 OD 连通可靠性恢复率最高，后续阶段的恢复率逐渐降低。这说明修复阶段 1 的关键单元能够大幅提升 OD 的连通可靠性，所以在修复顺序上具有最高优先级，之后依次是阶段 2 和阶段 3 识别出的关键单元。对应表 10 中，阶段 1 识别的关键单元首先修复，之后依次为阶段 2 和阶段 3 识别的关键单元。所以决策者可以获得关键单元的修复优先级，从而实现区域公路网连通可靠性的恢复。

表 11 OD 连通可靠性的恢复率

Tab. 11 Recovery rate of OD connectivity reliability (%)

OD	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
O1D2	—	999 899. 637	177. 778	18. 765
O2D1	—	9 999 878. 622	66. 667	18. 765
O1D4	—	99 999 867. 010	362. 963	18. 765
O4D1	—	993 663 644. 123	179. 548	18. 765
O2D4	—	9 900. 000	66. 667	0. 000
O4D2	—	9 900. 000	66. 667	0. 000

4 结论

区域公路网震后连通可靠性分析和系统功能恢复在应急响应阶段至关重要。本文采用经验预测方法计算得到公路单元的抗震可靠性，通过事件树和成功树分析构建区域公路网对应的贝叶斯网络，并将单元的抗震可靠性作为贝叶斯网络的先验概率输入，建立了区域公路网连通可靠性分析模型；根据敏感度分析和贝叶斯更新，提出关于系统功能恢复的启发式方法。将该方法应用于汶川地震中的实际区域公路网，得到如下结论：

- (1) 区域公路网连通可靠性分析模型建立起路段、桥梁、隧道和边坡单元结构破坏和公路网连通功能之间的联系，可根据公路单元的实际状态实时更新公路网的连通可靠性。
- (2) 基于贝叶斯更新的启发式方法识别出的关键单元及其修复优先级，能够促进区域公路网连通可靠性的快速恢复。

参考文献：

陈乐生. 2012. 汶川地震公路震害调查[M]. 北京: 人民交通出版社.

邓亚娟, 马荣国, 胡绍荣. 2009. 地震灾害下公路运输系统防救灾关键技术研究[J]. 公路, (7): 231 - 237.

何祥, 袁永博, 张明媛. 2016. 城市交通系统地震级联失效研究[J]. 自然灾害学报, 25(6): 79 - 86.

李健, 周漪, 刘威. 2017. 上海市历史城区震后应急救援路网评价与优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 17(2): 227 - 233.



- 李廷辉,林均岐,刘金龙. 2021. 汶川  $M_s 8.0$  地震公路易损性研究[J]. 地震研究, 44(4): 682–688.
- 李英民,王丽萍,刘立平. 2009. 山地城市交通系统震害预测模型及其应用[J]. 西南交通大学学报, 44(2): 171–176.
- 李永义. 2014. 交通系统地震应急决策模型与方法[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 孙海,高惠瑛. 2017. 基于粒子群优化投影寻踪概率模型的桥梁地震震害预测方法研究[J]. 世界地震工程, 33(3): 152–159.
- 王明文,孙小年,王海燕. 2012. 高烈度地震区公路网抗灾能力评价方法研究[J]. 公路, (4): 155–159.
- 王余庆,辛鸿博,高艳平,等. 2001. 预测岩土边坡地震崩滑的综合指标法研究[J]. 岩土工程学报, 23(3): 311–314.
- 杨翰雯,欧进萍. 2019. 公路干线多种类基础设施震害预测的实用方法[J]. 黑龙江交通科技, 42(9): 1–4.
- 杨静,李大鹏,翟长海,等. 2019. 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题[J]. 中国科学基金, 33(5): 525–532.
- 朱美珍. 1994. 公路桥梁震害预测的实用方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 22(3): 279–283.
- Aydin N Y, Duzgun H S, Heinemann H R, *et al.* 2018. Framework for improving the resilience and recovery of transportation networks under geohazard risks[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 31: 832–843.
- Bensi M T. 2010. A Bayesian network methodology for infrastructure seismic risk assessment and decision support[D]. Berkeley: University of California, Berkeley.
- Fang X Q, Lin J Q, Zhou X L, *et al.* 2008. Damage evaluation of tunnels in earthquakes[C]//Proceedings 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: 8–16.
- Kabir S, Papadopoulos Y. 2019. Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: a review[J]. Safety Science, 115: 154–175.
- Kjærulff U, Gaag L C V D. 2000. Making sensitivity analysis computationally efficient[C]//Proceedings of the Sixteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence Stanford, California: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 317–325.
- Mine H, Kawai H. 1982. Mathematics for reliability analysis[M]. Tokyo: Asakura-shoten: 12–14.
- Tang Y, Huang S P. 2019. Assessing seismic vulnerability of urban road networks by a Bayesian network approach[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 77: 390–402.

## Connectivity Reliability Analysis and System Function Recovery of Post-earthquake Regional Highway Network

JIANG Liguó, HUANG Shuping

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

### Abstract

To study the post-earthquake connectivity of the regional highway network, the connectivity reliability is used as an index to calculate the aseismic capability of highway units through the empirical prediction. The event tree and success tree are used to determine the Bayesian network structure and conditional probability tables. Then, an analytical mode of connectivity reliability of regional highway network is constructed with the aseismic capability of highway units as prior probability. Based on the sensitivity analysis and Bayesian updating, a heuristic method is proposed for identifying the rehabilitation priority of critical units, which will provide support for recovering the connectivity of highway network system. The proposed model and methodology are applied to a regional highway network consisting of G213 Highway and S9 Road in Wenchuan earthquake disaster area. Results show that the proposed model integrates structural damage to the highway network with the connectivity of the highway network, and the critical units and their repair priority identified by the heuristic can significantly improve the connectivity of the regional highway network.

**Keywords:** regional highway network; connectivity reliability; Bayesian network; highway units; system function restore; the Wenchuan earthquake