论 文

基于多指标分析的路网单元抗震改造重要度评价

侯本伟^{1,2}, 李小军^{1,2}, 韩强¹, 刘爱文², 杜修力^{1*}

1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

* E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn

收稿日期: 2017-02-10; 接受日期: 2017-06-22; 网络出版日期: 2017-11-03

国家科技支撑计划(批准号: 2014BAL05B05)资助项目

摘要 基于路网拓扑布局和桥梁结构属性, 进行路段抗震提升重要度评价, 可为公路交通系统震前加固改造、灾害应急准备等工作提供依据. 本文采用4种不同特性的单元重要度评价指标: 介数、连通概率灵敏度、路网震后通行时间和路网震前通行时间影响重要度, 计算路段及其内部桥梁和道路单元的抗震提升重要度. 为综合考虑多指标评价结果对单元重要度排序的影响, 本文采用逼近理想排序法(TOPSIS)多属性决策方法评价路段的综合重要度. 通过实例路网模型应用, 分析了不同指标的特点, 比较了单指标评价与多指标综合评价结果的差异. 结果表明, 不同指标的重要度评价结果存在明显差异, 基于多指标分析的路段抗震改造重要度, 综合考虑了网络拓扑结构、单元地震反应、单元通行能力、OD(起止点对)交通量的影响, 为决策者提供了综合判别的依据.

关键词 公路网络, 抗震改造重要度, 多指标评价, 震后通行能力

1 引言

近年来, 中国西南地区破坏性地震频发, 交通网络破坏严重, 交通功能大范围中断^[1,2], 保障路网通行能力成为震后救灾活动面临的首要任务. 1994年, 美国Northridge地震共造成286座州际公路桥梁破坏, 而根据加州公路加固改造计划进行过抗震加固的桥梁均经受住了地震的考验^[3,4]. 在经费预算有限的条件下, 合理评价路网中桥梁和道路单元的抗震提升重要度, 进而制定桥梁和道路的抗震加固改造计划, 是提升路网系统抗震能力的重要途径.

路网单元(桥梁或道路)抗震改造提升策略研究, 可以分为路网改造优化模型和单元重要度排序方法

两类^[5]. 在基于单元重要度排序的应用方面, Shinozuka等人^[6]和Sgaravato等人^[7]采用桥梁改造加固前后的路网震后通行时间差值表示桥梁的改造重要度. 赵湘育等人^[8]根据网络连通可靠性模型中的单元概率灵敏度表示路段重要度. Sohn等人^[9]采用两种路段重要度计算方法: 1) 常态运行(无破坏)路网分析模型中, 路段破坏对路网通行状态的影响; 2) 遭受地震破坏的路网分析模型中, 破坏路段提升为无破坏状态后对路网通行状态的影响. 况爱武^[10]和Sohn^[11]采用路段失效产生的路网通行时间增量与失效概率的乘积表示路段的提升重要度. Tang等人^[12]将路网中通行能力大但易遭破坏的路段定义为关键路段. Rokneddin等人^[13]选择桥梁状态指数评分、结构破坏概率、所在路段介数、

引用格式: 侯本伟, 李小军, 韩强, 等. 基于多指标分析的路网单元抗震改造重要度评价. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 217–228
Hou B W, Li X J, Han Q, et al. Seismic retrofit priority assessment of highway networks based on multi-indices analysis (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 217–228, doi: 10.1360/N092017-00040

路网OD节点连通可靠度影响、路网区域拓扑结构影响共5种指标评价桥梁改造重要度, 结果表明, 不同指标排序得到的桥梁改造重要度差异比较大, 实际使用时应由决策者选择适用的指标或标准.

由于实际路网模型的复杂性和不确定性, 很难用单个指标全面刻画路段的重要度. 本文首先从上述文献[6~13]采用的路段或桥梁重要度的指标中, 选取介数、连通概率灵敏度、震后通行时间影响和单元失效对路网震前通行时间影响共4个与路网拓扑结构相关的指标, 通过算例分析比较了不同指标的特点; 然后基于多属性决策方法, 计算多指标耦合的路段综合重要度, 为确定路段的抗震改造次序提供了依据.

2 路网震后通行状态分析模型

由于路网单元的连通概率灵敏度和震后通行时间影响指标, 是基于地震破坏路网的连通可靠度分析模型和交通流量分析模型计算得到的(详见第3节), 因此, 本节先介绍上述两种分析模型的基本流程.

路网模型的拓扑结构构成示意如图1所示, 模型中两相邻节点间的连接道路及桥梁简化为1条路段(边), 路段由多个被分割的道路和桥梁单元串联组成. 交通路网的震后通行状态评价工作主要包括3部分内容^[4,6]: 计算路段单元(桥梁或道路)结构的地震破坏状态, 建立单元结构破坏状态与路段通行功能损失对应关系, 评价路网震后通行状态.

2.1 单元地震破坏状态与路段震后通行能力

进行路网中桥梁和道路单元群体的地震破坏状态分析时, 采用经验易损性曲线^[14~16]模型计算不同地震作用强度下(如地震动峰值加速度(PGA)), 桥梁和道路结构处于5个破坏等级(基本完好(D_1)、轻微破坏(D_2)、中等破坏(D_3)、严重破坏(D_4)、毁坏(D_5))的概率.

进行路网震后交通流量通行时间分析时, 需将桥梁和道路单元破坏状态转换为路段的震后通行能力和行车速度折减系数. 参考文献[4,6,17]的取值, 本文采用的单元破坏状态对应的通行状态折减系数见表1. 对于多个道路和桥梁单元串联组成的路段, 路段的震后通行能力由其构成单元的最低通行能力值确定, 路段的震后自由流时间(车速/路长)为其构成道路或桥

梁单元的震后自由流时间之和.

进行路网震后连通可靠度计算时, 各个单元仅有“连通”和“失效”两种状态, 根据式(1)将单元的5个破坏状态概率转化为单个连通状态的概率值:

$$P(R) = \sum_{i=1}^5 P(RD_i) = \sum_{i=1}^5 P(R | D_i)P(D_i), \tag{1}$$

其中 $P(R)$ 为桥梁或道路单元的震后连通概率(连通可靠度), $P(D_i)$ 为单元处于破坏状态 D_i 的概率. $P(R|D_i)$ 表示单元处于破坏状态 D_i 时, 仍保持连通的概率; 参考文献[17,18]的取值, 本文采用{1.0,0.9,0.6,0.3,0}. 路段的震后连通可靠度为其构成单元连通可靠度值的乘积.

2.2 路网震后通行状态分析

在得到桥梁和道路单元的地震破坏状态(概率)及其对应的通行能力后, 本节采用震后连通可靠度^[13,19]和交通流通行时间^[6,20]两种模型评价路网的震后通行状态. 由于单元的地震破坏状态以概率形式表示, 路网震后通行状态分析属于概率网络系统功能分析问题, 采用基于Monte Carlo(MC)方法^[21,22]求解两种模型的计算流程见图2.

在路网震后连通可靠度分析模型中, 将路网交通流量的起(O)点视为源点, 将交通流量终(D)点视为汇点; 这样可以建立以多个O点为源点、以不同D点为汇点的“源→汇点”连通可靠性问题(2端连通性问题,

图1 交通路网构成示意

表1 桥梁和道路单元震后通行能力和车速折减系数

折减系数	破坏状态				
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
通行能力	1.00	0.90	0.60	0.30	0.00
行车速度	1.00	0.80	0.60	0.40	0.00

图2 路网震后通行状态模拟计算流程图

P_{Rsi} , 其中 s 为源点, i 为汇点); 由于路网中很多节点即是O点又是D点, 也可将路网连通可靠性问题转化为K端可靠性问题^[13,23]和全端可靠性问题. 对于由所有O点和D点组成的节点集 K , 路网的K端连通可靠度为节点集 K 中所有D点均被O点连通的概率(P_{RK}), 路网全端连通可靠度为路网中所有O点与全部节点连通的概率(P_{RA}). 求解上述连通可靠性问题时, 通过增加一个虚拟源点的方法将多源点问题转化为单源点问题^[5].

在路网震后通行时间分析模型中, 采用美国联邦公路局(BPR)路阻函数^[24]表示路段通行时间(阻滞系数取值为 $\alpha=0.15$ 、 $\beta=4.0$), 采用容量限制-增量分配方法^[24]进行含有地震破坏路段的路网交通流量分配, 计算得到每个路段的震后通行时间(t_a)、流量分配值(x_a)和路网总体通行时间($\sum(t_a \cdot x_a)$)的估计值.

3 路网单元抗震改造重要度评价指标

3.1 介数

介数是描述网络单元拓扑结构重要度的常用指标^[13,25,26]. 在网络模型中, 边 L_i 的介数为网络中所有节点对组合 v_k 与 v_j 之间的最短路径经过 L_i 的次数(其中 $k \neq j$). 经过 L_i 的最短路径越多, 其介数值越大, 则边 L_i 越重要. 在路网模型中, 将路段视为无向边, 以路段长度表示

边权重, 路段介数表达式为

$$BC(i) = \sum_{k \neq j \in V} \frac{n_{k \rightarrow j}(i)}{n_{k \rightarrow j}}, \quad (2)$$

其中, $n_{k \rightarrow j}$ 为节点 k 至节点 j 的最短路径的数目; $n_{k \rightarrow j}(i)$ 为 $n_{k \rightarrow j}$ 个最短路径经过路段 L_i 的次数. 根据式(2)计算得到路段介数后, 桥梁和道路单元的介数即为其所在路段的介数.

3.2 震后连通概率灵敏度

桥梁或道路单元的震后连通概率灵敏度, 是指此单元的连通可靠度值变化对路网震后连通可靠度影响的相对度量值^[8,27]. 对于含有 n_b 座桥梁、 n_h 条道路单元的路网模型, 单元 i 的连通可靠度为 p_{i1} , 其概率灵敏度为^[28]

$$I_{\text{prob}}(i) = \frac{\partial P_{R,i}(\mathbf{p}_h; \mathbf{p}_b)}{\partial p_{i1}} = \frac{\Delta P_{R,i}}{\Delta p_{i1}} = \frac{P_{R,i}^* - P_R}{1 - p_{i1}}, \quad (3)$$

其中 $\mathbf{p}_h$ 和 $\mathbf{p}_b$ 分别为 $n_h \times 1$ 和 $n_b \times 1$ 维数值向量, 表示所有道路、桥梁单元的震后连通可靠度集; p_{i1} 为单元 i 的震后连通可靠度值($i=1, \dots, n_h+n_b$); $\Delta p_{i1}=1-p_{i1}$ 表示单元 i 的连通可靠度变化值, $\Delta P_{R,i}$ 为与 Δp_{i1} 对应的网络连通可靠度变化值; P_R 为基于 $\mathbf{p}_h$ 和 $\mathbf{p}_b$ 计算的路网震后连通可靠度, $P_{R,i}^*$ 表示仅将单元 i 的连通可靠度提升至1.0后计算的路网震后连通可靠度. P_R 和 $P_{R,i}^*$ 按第2.2小节方法计算.

按照式(3)计算路段的连通概率灵敏度时, 用 $P_{R,i}^*$ 替换 $P_{R,i}$, $P_{R,i}^*$ 为将路段 j 中的桥梁和道路单元的连通可靠度均提升至1.0后的路网连通可靠度.

3.3 震后通行时间影响重要度

基于桥梁和道路单元抗震能力提升前、后的路网震后通行时间差值, 评价单元的重要度^[6,7]. 单元 i 的震后通行时间重要度为

$$DT(i) = TT(\mathbf{p}_h, \mathbf{p}_b) - TT^{i*}, \quad (4)$$

其中 $\mathbf{p}_h$ 和 $\mathbf{p}_b$ 分别是维度为 $n_h \times 5$ 和 $n_b \times 5$ 的数值矩阵, 表示在路网道路、桥梁单元不同震害状态的概率; $TT(\mathbf{p}_h, \mathbf{p}_b)$ 表示采用单元破坏概率($\mathbf{p}_h, \mathbf{p}_b$)计算的路网震后总体通行时间, TT^{i*} 表示仅提升单元 i 的抗震能力(震后破坏状态概率为 $\{1.0, 0, 0, 0, 0\}$)的路网震后总体通行时间值, TT 和 TT^{i*} 按第2.2小节方法计算.

按照式(4)计算路段的震后通行时间重要度时, 用

TT^* 替换 TT , 则 TT^* 表示提升路段 j 中桥梁和道路单元的抗震能力后的路网震后总体通行时间。

3.4 震前通行时间影响重要度

根据桥梁或道路单元的地震破坏概率与单元破坏对路网震前通行时间的影响, 评价路段重要度^[11]。单元 i 破坏对震前通行时间影响重要度为

$$HT(i) = \Delta TT_i \cdot p_{ij} = (TT_i - TT) \cdot p_{ij}, \quad (5)$$

其中, $p_{ij} = 1 - p_{i1}$ 为单元震后连通失效概率; ΔTT 为单元 i 地震破坏导致其所在的路段关闭, 而产生的路网总体通行时间增加量; TT 表示震前正常运行时的路网总体通行时间; TT_i 表示单元 i 破坏后的路网总体通行时间。按照式(5)计算路段的重要度值时, 用 TT_j 替换 TT_i , 用 p_{ij} 替换 p_{if} , TT_j 为路段 j 的构成单元破坏后的路网总体通行时间, p_{ij} 为路段 j 的震后连通失效概率。

3.5 指标特性分析

根据第3.1~3.4小节的描述, 4种重要度指标的特性比较见表2。DT和HT指标考虑的影响因素较多, 计算过程复杂, 计算结果对于路网OD交通量和地震动荷载等影响因素的针对性强, 但计算结果的鲁棒性差; 当计算过程考虑的影响因素存在不确定性或发生变化时, 则DT和HT指标计算结果的适用性变差。

DT和 I_{prob} 指标的计算过程, 采用第2.2小节的MC方法进行多次模拟求解路网震后通行时间和连通可靠度, 每次模拟均需进行交通流量分配或连通性判别, 计算量较大; HT指标的计算仅需进行两次交通流量分配, 计算量较小; BC指标的计算仅考虑网络拓扑布局, 计算量最小。

4 基于多属性决策的路段综合重要度计算

由于考虑的影响因素不同, 不同指标的评价结果间存在差异。根据路网单元重要度制定抗震加固改造方案时, 既要体现对路网震后通行能力影响因素的针对性, 又须考虑震后实际状态的不确定性, 有必要综合考虑多个指标的评价结果。

多属性(指标)决策是在综合考虑方案的多个属性的情况下, 进行方案排序的方法。多属性决策问题的解法包括“逼近理想排序法”(TOPSIS)、“消去与选择转换法”(ELECTRE)和“偏好顺序结构评估法”(PROMETHEE)等^[29], 其中TOPSIS方法的计算过程仅需要1种决策者主观判断输入量(属性的权重), 广泛应用于各类网络单元重要度评价^[25,30]。

本节采用TOPSIS方法计算多指标影响下路段及其构成(桥梁和道路)单元的综合重要度。将每个待评价的路段或其构成单元当作一个方案, 将评价单元重要度的不同指标看作方案的不同属性, 则路段或其构成单元的综合重要度评价转化为多属性决策问题, 决策准则即为各方案的综合重要度。评价步骤如下:

Step 1: 构建决策矩阵。对于有 n 个单元, 每个单元对应4个评价指标的路网模型, 其决策方案(单元)集为 $E = \{e_1, \dots, e_n\}$, 方案属性(指标)集为 $X = \{x_1, \dots, x_4\}$; 第 i 单元的第 m 个指标值记为 $e_i(x_m)$ ($1 \leq i \leq n$; $1 \leq m \leq 4$), 构成决策矩阵:

$$I = \begin{bmatrix} e_1(x_1) & \cdots & e_1(x_4) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_n(x_1) & \cdots & e_n(x_4) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Step 2: 计算指标权重。由决策者根据指标的特点及评价问题的特点, 选取指标赋权方法。本节采用基

表2 不同重要度指标的影响因素

影响因素	重要度指标类型			
	BC	I_{prob}	DT	HT
路网拓扑布局	√	√	√	√
单元地震破坏状态		√	√	√
单元震后通行能力			√	
单元正常通行能力				√
路网交通流量			√	√

于排序法的层次分析法(AHP)法^[31], 计算4个指标的权重. 方法如下: 决策者确定4个指标的重要性顺序; 采用(0, 1, 2)三标度法建立比较矩阵; 利用极差法构造判别矩阵, 进行一致性检验后, 计算得到4个指标的对应权重.

Step 3: 构建加权决策矩阵. 为统一量纲, 将决策矩阵进行标准化处理, 处理后的决策矩阵表示为 $R=[r_{im}]_{n \times 4}$, 其中 $r_{im}=e_i(x_m)/e_i(x_m)_{\max}$, $e_i(x_m)_{\max}=\max\{e_i(x_m)|1 \leq i \leq n\}$. 根据指标权重值和标准化矩阵 R , 构成加权决策矩阵:

$$Y=[y_{im}]_{n \times 4}=[w_m \cdot r_{im}]_{n \times 4}=\begin{bmatrix} w_1 \cdot r_{11} & \cdots & w_4 \cdot r_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 \cdot r_{n1} & \cdots & w_4 \cdot r_{n4} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Step 4: 确定正、负理想方案. 根据加权决策矩阵分别计算正理想决策方案(向量) A^+ 和负理想决策方案(向量) A^- :

$$\begin{cases} A^+ = \left\{ \max_{i \in \{1, \dots, n\}} (y_{i1}, \dots, y_{i4}) \right\} = \{y_1^{\max}, \dots, y_4^{\max}\}, \\ A^- = \left\{ \min_{i \in \{1, \dots, n\}} (y_{i1}, \dots, y_{i4}) \right\} = \{y_1^{\min}, \dots, y_4^{\min}\}. \end{cases} \quad (8)$$

Step 5: 评价对象与理想方案的贴近度(综合重要度). 按照式(9)计算每个方案的贴近度:

$$Z_i = \sqrt{B_i^-} / (\sqrt{B_i^-} + \sqrt{B_i^+}), \quad 0 \leq Z_i \leq 1, \quad (9)$$

其中, $B_i^+ = \sum_{m=1}^4 (y_{im} - y_m^{\max})^2$, $B_i^- = \sum_{m=1}^4 (y_{im} - y_m^{\min})^2$ 分别为方案 A_i 到正理想方案 A^+ 和负理想方案 A^- 的距离, $1 \leq i \leq n$.

按照式(9)计算的方案的贴近度 Z_i 值, 即为每个路段或其构成单元的综合重要度.

5 算例分析

本节选取某城乡公路网络算例^[18](图3), 对第3节的4个指标进行特性分析, 并采用第4节方法计算路段及其构成单元的抗震改造综合重要度. 算例路网由45条道路和26座桥梁组成. 两种震后救灾OD交通流量信息见图4^[22], 其中20和30分别对应2个出救点{1, 31}和3个出救点{1, 9, 31}工况. 假定在路网附近发生 $M_s 7.0$ 级地震, 破裂面走向 $N30^\circ E$, 采用中国东部地震动参数衰减公式^[32]得到的地震烈度圈见图3^[22], 图中虚线为烈度圈, {XI, VIII, VII}为该烈度圈对应的中国地震烈度等级. 根据桥梁和道路中点处的PGA值, 按照汶川地震经验易损性曲线^[14,16]分别计算桥梁和道路的震后破坏状态概率见图5^[22]. 图5中单元号1~45表示道路单元, 单元号46~71表示第1~26号桥梁单元.

采用第2.2小节的MC方法模拟 $N=10^5$ 次, 得到的{2端, K端, 全端}连通可靠度值为20工况, {0.77~0.99,

图3 (网络版彩图)算例公路网络及地震作用影响场

图4 (网络版彩图)震后救灾OD交通量

0.52, 0.35}; 3O工况, {0.83~0.99, 0.63, 0.42}. 得到的路网震后总体通行时间均值为2O工况, 1218.86(pcu.h); 3O工况, 732.79(pcu.h).

5.1 重要度指标特性分析与比较

5.1.1 单元介数重要度

算例路段的介数重要度计算结果见图6, 图中“所有点对”为采用式(2)计算的结果, “OD点对(3O)”为3O工况采用Rokneddin等人^[13]方法的计算结果. 由图6可知, 根据式(2)计算的“所有点对”介数值中, 排序前20%的路段{20, 6, 25, 22, 7, 42, 28, 24, 17}均为连接算例路

网左上和右下两则区域的重要路段, 体现了路段对网络整体拓扑结构的影响; 而在“OD点对(3O)”的介数值中, 排序前20%路段{1, 8, 43, 3, 15, 18, 24, 37, 29}多为源点邻近的路段; Rokneddin等人^[13]以路网所有OD对间的最短路经过路段的次数表示路段介数, 对于OD信息稀疏的村镇公路网络, 此方法结果将依赖于OD点位置, 不能体现路段对路网整体连通能力的影响; 对于OD信息稠密的城市路网, 此方法的计算结果将与式(2)结果类似.

5.1.2 单元连通概率灵敏度

采用第3.2小节方法, 计算得到的3O工况道路和桥梁单元的震后连通概率灵敏度值见图7. 图中结果(纵坐标)包含了: ①多源点至每个节点(2端, 汇点号2~8和10~30), ②多源点至全部D点(K端), ③多源点至全部节点间(全(A)端)的连通可靠性问题的概率灵敏度; 由于第①项内容只能反映道路或桥梁单元对单个节点连通概率的影响, 图中还给出了多源点至所有D点的2端连通概率灵敏度的均值(④, mK)、多源点至全部节点的2端连通概率灵敏度的均值(⑤, mA). 将图7中的第②~⑤项数值降序排列, 排序前15个单元号(总单元数20%分位点)见表3. 为比较3O与2O工况的差异, 表3给出了2O工况部分数据的排序结果. 从表3中各列的排序结果可知, 不同指标、不同工况计算的单元重要度存在明显差异.

从图7和表3中 I_{prob} 项数据可以看出: 1) 图中每个单元的第①项取值, 对于不同的汇点取值差异较大; 说明2端连通性问题的单元概率灵敏度只适用于其对应

图5 道路和桥梁单元地震破坏状态的概率及连通可靠度

图6 路段的介数值

汇点,不能反映单元对路网整体连通概率的影响。2) 图7中第④、⑤项数值明显小于②、③项的相应值,表3中3O工况②与④项,③与⑤项对应列单元号的重合数分别为8,9,重合率分别为53.33%,60%;说明所有D点的2端连通性概率灵敏度的均值,不能反映单元对网络整体连通性的影响。3) 图7中第②、③项的取值相差较小,说明K端和全端连通问题的概率灵敏度,均反映了单元对网络整体连通概率的影响;表3中3O-K与3O-A列、2O-K与2O-A列的单元重合数分别为10,11,说明K端、全端连通性问题的单元概率灵敏度排序结果相近。根据第2.2小节定义,K端连通问题考虑了路网OD点位置信息,本文建议采用单元的K端连通概率灵敏度。4) 表3中3O-K列与2O-K列的单元重合数为11,其中3O-K中的单元{8,18,35,59}不在2O-K列中,这些单元是3O工况中源点9的邻近单元;因此,K端连通概率

灵敏度受到源点(O点)位置及数量的影响。

5.1.3 单元震后通行时间、震前通行时间影响重要度

2O,3O工况中每个道路和桥梁单元的震后通行时间重要度 $DT(i)$ 值见图8,3O工况中单元破坏影响重要度 $HT(i)$ 见图8,将图8中不同工况的 DT 和 HT 数值降序排列,排序前15个单元号见表3。

从图8可以看出, DT 和 HT 重要度指标中不同单元的取值相差较大,每个指标只有少数大值重要度单元,这与Sgaravato等人^[7]的算例规律相同;表3所示的 DT 和 HT 排序中,排序第1和15位单元的重要度值(pcu.h)分别为3O- $DT(1)=33.0$,3O- $DT(18)=3.89$;2O- $DT(1)=147.02$,2O- $DT(23)=9.15$; $HT(7)=40.95$, $HT(70)=3.37$ 。

图8中部分单元的 DT 值出现负值,原因在于式(4)计算 DT 值时采用第2.2小节的MC模拟方法,当这些单元的 DT 值较小且处于MC模拟的误差项范围内时,可能产生负值。因此,这些取值负单元的真实 DT 值应该是较小的正值,可以忽略其对重要单元识别的影响。

表3中 DT 项的3O与2O列的单元重合数为7,其中3O列中的单元{8,18,21,29,35,36,43,59}不在2O列中,单元{8,18,59}是源点9的邻近单元。因此, DT 指标的计算结果对源(O)点位置影响比较敏感,若考虑到震后实际应急出救点位置的不确定性,则不能仅依照 DT 单个指标确定单元的重要度。

表3中 DT 项3O列与 HT 项3O列的单元重合数为11,其中 DT 项中的单元{2,33,35,36}不在 HT 项中。原因在

图7 路网单元连通概率灵敏度值(3O工况)

表3 不同工况单元 I_{prob} , DT , HT 重要度排序

值排序号	I_{prob}						DT		HT
	3O K	3O A	3O mK	3O mA	2O K	2O A	3O	2O	3O
	②	③	④	⑤	—	—	—	—	—
(1)	23	12	23	6	8	12	1	1	1
(2)	21	24	3	29	23	8	24	24	22
(3)	3	23	21	66	3	24	37	22	24
(4)	26	22	29	23	21	23	22	2	8
(5)	11	21	8	24	33	33	8	47	29
(6)	6	33	66	8	18	22	29	37	37
(7)	27	3	11	21	59	21	35	46	43
(8)	30	26	26	33	26	3	33	34	6
(9)	2	25	27	22	2	26	2	6	21
(10)	69	6	6	1	11	25	59	33	18
(11)	70	37	43	11	47	6	36	69	59
(12)	71	36	67	12	6	18	21	27	15
(13)	47	2	68	68	36	59	6	48	68
(14)	36	27	36	67	27	36	43	11	66
(15)	33	11	35	27	35	2	18	23	67

图8 路网单元震后通行时间、失效影响重要度

于这些单元所在路段的震前通行能力较小(图3), 阻抗较大, 在路网震前交通流分配的流量较小, 相应的 HT 值较小; 而路网震后交通流分配中, 由于地震破坏导致其他路段的通行能力下降, 阻抗上升, 则单元{2, 33, 35, 36}所在路段分配的震后交通流量增加, 相应的 DT 值较大. 因此, DT 指标体现了路段震后通行能力变化的影响.

5.2 路段重要度与其构成单元重要度比较

对于3O工况, 路段的K端连通概率灵敏度(I_{prob})和

震后通行时间提升重要度(DT)见图9和10. 为便于比较, 图9和10中还给出了路段中的道路单元、道路+桥梁单元的 I_{prob} 和 DT 值. 将图9和10中路段整体的 I_{prob} 和 DT 值降序排列, 前9个(20%分位点)路段号分别为{23, 21, 3, 26, 30, 11, 2, 6, 27}, {1, 24, 37, 22, 5, 2, 18, 29, 43}.

通过图3, 9, 10和表3中3O-K, 3O-DT列数据比较可知, 1) 对于 I_{prob} 指标, 路段{23, 21, 3, 26, 11, 6, 27}为不含桥路段, 道路单元的 I_{prob} 值即为路段的 I_{prob} 值, I_{prob} 值较大的道路单元对应的路段 I_{prob} 值也较大; 对于含桥梁路段的 I_{prob} 值, 路段整体<(道路+桥梁单元). 原因

图9 路段连通概率灵敏度(30工况)

图10 路段震后通行时间重要度(30工况)

在于路网连通可靠度分析模型中, 路段可靠度是道路和桥梁单元的连乘积; 对于路段中的所有单元, 某个单元完全提升后的剩余单元状态集与其他单元提升后的剩余单元状态集存在交集。2) 对于 DT 指标: 路段 $\{1, 24, 37, 22\}$ 为不含桥路段, 道路单元的 DT 值即为路段的 DT 值, DT 值较大的道路单元对应的路段 DT 值也较大; 对于含桥梁路段的 DT 值, 路段整体 $>$ (道路+桥梁单元); 路段 $\{5, 28, 30, 31\}$ 的 DT 值较高, 其对应的道路+桥梁单元的 DT 值却很低。原因在于路网震后通行时间分析模型中, 路段的通行能力为路段中包含的单元通行能力的最小值, 当路段中其他单元的通行能力较低时, 单个单元的提升并不一定可以提升路段整体的通行能力, 导致单元的 DT 值较小。

5.3 多指标综合改造提升重要度

基于第5.1和5.2小节分析, 选用所有节点对间

的路段介数、路段 K 端连通概率灵敏度、震后通行时间重要度、震前通行时间影响重要度4个指标评价路段的抗震提升重要度, 算例路网30工况的各指标计算结果见图11。

采用第4节的TOPSIS方法计算综合重要度时, 需要决策者对各指标的重要性排序, 基于前面的分析, 本节算例采用的指标重要性排序为 $DT > I_{\text{prob}} > HT > BC$, 采用排序AHP方法计算指标权重时, 极差元素对的相对重要程度取值为3, 得到的指标权重为 $\{0.3988, 0.2765, 0.1917, 0.1330\}$ 。基于TOPSIS方法计算得到的路段综合重要度见图12, 其中根据式(6)及图11和12计算的指标归一化结果见图13。

比较图11和13, 可以看出不同指标的评价结果存在明显差异。路段1的 BC 和 I_{prob} 值较小, 但此路段的 DT 和 HT 指标最大, 说明路段1对路网的整体连通可达性影响较小, 但对路网交通流量运输功能的影响大。路段20, 23的 BC 值, I_{prob} 值最大, 但此2个路段的 DT 和 HT 指标值较小, 且有 $DT(20) < DT(23)$, $HT(20) > HT(23)$; 由于本节采用的指标权重 $w_{DT} > w_{HT}$, 因此, 路段23的综合重要度大于路段20。

从图13可以看出, 综合重要度指标耦合了不同指标的特点, 单个指标的不同路段的取值离散度较大, 而综合重要度的离散度相对较小。图中 BC , I_{prob} , DT , HT 指标的所有单元重要度归一化数值的中位数分别为0.2361, 0.1829, 0.0991, 0.0293, 综合指标对应的中位数为0.2282。

对比图12和3可知, 算例中路段综合改造提升重要度排序20%的路段均分布于设定地震震中邻近的位置, 位于地震烈度VIII度和IX度区内, 这与震后高烈度区道路和桥梁破坏严重、急需修复的震害现象较为吻合。而图11中所示的单个指标评价的重要路段分布, 并未体现这一规律。因此, 多指标评价方法计算的路段抗震改造提升综合重要度结果更为合理, 可为决策者提供综合判断的依据。

6 总结

为合理评价路网中桥梁和道路单元的抗震提升重要度, 本文采用介数、连通概率灵敏度、震后通行时间影响和震前通行时间影响4种评价指标, 分析路段及其内部桥梁和道路单元的改造提升重要度, 通过

图 11 (网络版彩图)不同指标的路段重要度评价结果(30工况). (a) 介数; (b) 连通概率灵敏度; (c) 震后通行时间影响重要度; (d) 震前通行时间影响重要度

图 12 (网络版彩图)路段综合重要度(30工况)

算例路网分析了不同指标的特点; 采用TOPSIS多指标决策方法, 计算了多指标评价的路段综合改造提升重要度.

算例分析结果表明, 对单个出行目标点的2端(源

图 13 (网络版彩图)路段不同指标重要度及综合重要度归一化值(30工况)

→汇点)连通性问题, 单元概率灵敏度适用于针对单个汇点连通可靠度的提升问题; 对于所有OD点的K端连通性问题, 单元概率灵敏度反映了单元对网络整体连通概率的影响. 路网模型中源点(交通流量起点)的位置及数量, 对单元连通概率灵敏度、震后通行时间重要度值产生显著影响. 对于含有多个桥梁和道路单

元的路段, 路段整体重要度值可合理反映其内部单元提升对路网震后通行时间及连通可靠度的影响. 在地震作用强度较大的区域内, 路段的综合改造提升重要度值较高.

不同指标的重要度评价结果存在明显差异, 基于多属性决策方法计算的路段抗震加固改造重要度, 本文综合考虑了针对性指标和鲁棒性指标的评价结果, 为决策者提供了综合判断的依据.

参考文献

- 1 刘爱文, 夏珊, 徐超. 汶川地震交通系统震害及震后抢修. 震灾防御技术, 2008, 3: 243–250
- 2 刘金龙, 林均岐, 刘如山, 等. 芦山4.20地震公路交通系统震害调查分析. 自然灾害学报, 2013, 22: 18–23
- 3 Fan Y, Liu C, Lee R, et al. Highway network retrofit under seismic hazard. *J Infrastruct Syst*, 2009, 16: 181–187
- 4 Chang L, Elnashai A S, Spencer Jr B F. Post-earthquake modeling of transportation networks. *Struct Infrastruct Eng*, 2012, 8: 893–911
- 5 Chang L. Transportation system modeling and applications in earthquake engineering. Dissertation of Doctoral Degree. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010
- 6 Shinozuka M, Murachi Y, Dong X, et al. Effect of seismic retrofit of bridges on transportation networks. *Earthq Engin Vib*, 2003, 2: 169–179
- 7 Sgaravato M, Banerjee S, Shinozuka M. Optimal seismic bridge retrofit strategy under budget constraint. In: Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, 2008
- 8 赵湘育, 王东炜, 张刚. 网络系统可靠度和单元概率重要度的随机模拟分析. 郑州大学学报: 理学版, 2009, 4: 108–111
- 9 Sohn J, Kim T J, Hewings G J D, et al. Retrofit priority of transport network links under an earthquake. *J Urban Planning Dev*, 2003, 129: 195–210
- 10 况爱武. 基于可靠性的城市交通网络分析. 博士学位论文, 长沙: 长沙理工大学, 2012
- 11 Sohn J. Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: An accessibility approach. *Trans Res Part A-Policy Practice*, 2006, 40: 491–506
- 12 Tang X Y, Cheng L, Xu S. Identification of critical links under earthquake hazards for highway networks. *J Southeast Univ Engl Ed*, 2009, 25: 531–535
- 13 Rokneddin K, Ghosh J, Dueñas-Osorio L, et al. Bridge retrofit prioritisation for ageing transportation networks subject to seismic hazards. *Structure Infrastructure Eng*, 2013, 9: 1050–1066
- 14 陈力波, 郑凯锋, 庄卫林, 等. 汶川地震桥梁易损性分析. 西南交通大学学报, 2012, 47: 558–566
- 15 宗亮, 王元清, 杨赛霓, 等. 基于HAZUS平台的中国公路桥梁震害评估模型研究. 土木工程学报, 2014, 47: 263–268
- 16 廖臻. 汶川地震公路路基震害调查分析及易损性研究. 硕士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2012
- 17 兰日清, 丰彪, 王自法. 震后公路桥梁通行能力快速评估技术研究. 世界地震工程, 2009, 25: 81–87
- 18 李永义. 交通系统地震应急决策模型与方法. 博士学位论文. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014
- 19 李开兵. 城市交通系统抗震防灾规划研究. 博士学位论文. 上海: 同济大学, 2007
- 20 Carturan F, Pellegrino C, Rossi R, et al. An integrated procedure for management of bridge networks in seismic areas. *Bull Earthquake Eng*, 2013, 11: 543–559
- 21 Torbol M, Shinozuka M. The directionality effect in the seismic risk assessment of highway networks. *Structure Infrastructure Eng*, 2014, 10: 175–188
- 22 侯本伟. 生命线工程网络震后功能分析方法研究. 博士后研究报告. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2016
- 23 Liu M, Frangopol D M. Probability-based bridge network performance evaluation. *J Bridge Eng*, 2006, 11: 633–641
- 24 邵春福. 交通规划原理. 第2版. 北京: 中国铁道出版社, 2014
- 25 刘忠华, 于华, 杨方廷. 基于复杂网络理论的水网节点重要性评价研究. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1280–1294
- 26 吴华平, 王立新, 程贤, 等. 基于网络分析的生命线系统节点重要性评价—以广州市部分城区供电网络为例. 地震工程与工程振动, 2015, 35: 232–238
- 27 Wang Y, Au S K. Spatial distribution of water supply reliability and critical links of water supply to crucial water consumers under an earthquake. *Reliab Eng Syst Safety*, 2009, 94: 534–541
- 28 Kuo W, Zhu X. Importance Measures in Reliability, Risk, and Optimization: Principles and Applications. New York: John Wiley & Sons, 2012
- 29 Olson D L. Comparison of weights in TOPSIS models. *Math Comp Model*, 2004, 40: 721–727

- 30 于会, 刘尊, 李勇军. 基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法. 物理学报, 2013, 62: 020204
31 朱茵, 孟志勇, 阚叔愚. 用层次分析法计算权重. 北方交通大学学报, 1999, 23: 119–122
32 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 等. 中国分区地震动衰减关系的确定. 中国地震, 2000, 16: 99–106

Seismic retrofit priority assessment of highway networks based on multi-indices analysis

HOU BenWei^{1,2}, LI XiaoJun^{1,2}, HAN Qiang¹, LIU AiWen² & DU XiuLi¹

¹ Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

² Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Seismic retrofit priority analysis of roads and bridges is essential for seismic fortification and emergency relief preparation of highway networks. First, four types of network component importance ranking indices, including betweenness centrality, network connective reliability sensitivity, post-earthquake travel time delay and normal travel time delay of components are employed in this paper to calculate the seismic retrofit importance values of bridges and roads. Second, according to the component importance values of each individual index, the integrated importance values of components were evaluated by a multi-attribute decision method based on TOPSIS. Then, the seismic retrofit priorities of transportation network components are determined by the integrated importance measures. In case study, the characteristics of these indices are analyzed by results comparisons, and differences between the component importance ranking by one index and the integrate indices are also explored. The results of the case study show that the integrated importance measure has combined the impacts of network topology, component seismic response, component transportation capacity and OD trips, and provides the fundamentals for comprehensive component retrofit ranking of the highway transportation systems.

highway networks, seismic retrofit priority, multiple indices assessment, post-earthquake traffic capacity

doi: 10.1360/N092017-00040