

# 综合管廊多灾种耦合致灾风险评价方法

王述红, 张 泽, 侯文帅, 王斐笠

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对综合管廊灾害防护方面的不足, 对其多灾种耦合致灾的风险评价方法进行研究, 并对包头市新都中心区综合管廊潜在的灾害进行危险性分析. 首先对综合管廊可能发生的单一灾种建立危险评价指标; 然后针对综合管廊可能发生的多种灾害, 应用模糊数学方法, 建立耦合度模型, 得到多灾种之间的耦合关系; 最后提出综合管廊多灾耦合致灾的风险评价方法. 提出的风险评价方法可以用于综合管廊在各种灾害下的安全评价, 对城市综合管廊防灾减灾政策制定及综合规划有指导意义.

**关 键 词:** 综合管廊; 多灾耦合; 风险评价; 耦合度模型

中图分类号: TU 375.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)06-0902-05

## Risk Assessment Method on Multi-disaster Coupled Hazard for Urban Utility Tunnel

WANG Shu-hong, ZHANG Ze, HOU Wen-shuai, WANG Fei-li

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, E-mail: wangshuhong@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The risk assessment method of multi-disaster coupled hazard was studied in view of the shortcomings in the aspect of disaster prevention for utility tunnel, and a comprehensive risk analysis on the hazards of urban utility tunnel in Baotou Xindu central district was carried out. First, the single disaster risk assessment indicators for the potential disaster in utility tunnel was set up. Then, the coupled model regarding on multi-disaster in the utility tunnel was established in order to get the coupling relationship between multiple disasters. Finally, a risk assessment method was proposed for the multi-disaster coupled hazard. The risk assessment method proposed can be used to evaluate the safety of the urban utility tunnel under various disasters, which is of great significance to policy making and comprehensive planning of urban utility tunnel.

**Key words:** urban utility tunnel; multi-disaster coupled; risk assessment; coupled model

在土地资源极其宝贵的今天, 城市地下综合管廊以其在资源整合、检修便捷等方面的优越性成为城市市政设施建设的最佳选择之一. 在国家的大力支持下, 多地开始尝试设计建造地下综合管廊, 但都存在一定的问題, 例如设计经验不足、缺乏相关设计规范. 相比管廊结构构造设计方面的研究, 管廊内部管线种类选择以及灾害风险防控方面的研究更是处于起步阶段. 目前, 在国内已建成的综合管廊工程中, 直接纳入综合管廊的工程管线有电力电缆、通信电缆、给排水管道、热力

管道、燃气管道等<sup>[1]</sup>, 在管廊建造和运营的过程中存在电缆破损、管道泄漏导致中毒、爆炸、火灾等灾害的风险, 且致灾因素复杂, 灾害之间关联度较高, 如果仅对单一灾种进行评估, 其结果不够准确<sup>[2-3]</sup>, 因此综合管廊的多灾种灾害风险评价研究就显得非常必要.

本文针对综合管廊潜在的灾害进行危险性分析, 建立耦合模型, 在多灾种耦合致灾的一级指标下, 将不同灾种作为二级指标  $F_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ , 其中  $m$  为灾害种类), 然后根据各灾种的特点分

收稿日期: 2017-02-21

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51474050, U1602232); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LN2014006); 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540304, 20170520341); 硅酸盐建筑材料国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金资助项目(SYSJJ2017-08); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N17010829).

**作者简介:** 王述红(1969-), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授, 博士生导师.

别构建与二级指标  $F_i$  对应的三级指标  $F_{ij}(j=1, 2, \cdots, n, \text{其中 } n \text{ 为三级指标数量})$ , 根据三级指标的  
危险性 & 权重确定单一灾种危险性, 在单一灾种危险性分析的基础上, 提出多灾种耦合致灾风险评价方法, 分析多灾耦合致灾的危险性, 并将此方法运用于包头市综合管廊建设的灾害风险评估中.

## 1 工程概况

本文以包头市新都中心区综合管廊工程为研究对象, 该工程规划建设区域地势平坦, 地表为填土, 所处的地貌单元为大青山山前冲洪积扇边缘,

地质构造为阴山纬向构造带与鄂尔多斯断块之间的构造凹陷盆地, 气候干燥少雨, 场地内地下水初见水位位于地表下 9. 10 ~ 10. 50 m 之间 (标高在 1 041. 03 ~ 1 042. 64 m), 地下水类型属潜水. 包头市抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度值为 0. 20 g, 设计地震分组为第一组, 设计特征周期为 0. 35 s.

该工程管廊设计断面为矩形, 初步拟定入廊管线有电力电缆、通信电缆、给排水管道、燃气管道. 根据该工程场地条件以及入廊管线规划分析确定其在多灾耦合致灾一级指标下的二、三级指标如表 1 所示.

表 1 综合管廊多灾耦合致灾各级指标  
Table 1 Different levels of indicators for multi-hazard coupled disasters of the utility tunnel

二级指标	地震	不均匀沉降	爆炸	火灾	中毒
三级指标	断裂构造	灾害点密度	气体泄漏量	高温烟尘	气体浓度
	结构埋深	标准段长度	热辐射	热辐射	毒性级别
	地层位移	土体压缩性	冲击波	气体泄漏量	接触时间
	地震加速度	地下水水位	碎片数量	灼烧时间	窒息

## 2 单一灾种危险性分析

针对综合管廊可能发生的爆炸、火灾、气体泄漏致人中毒以及结构不均匀沉降或在地震作用下发生破坏等情况, 使用危险性指数  $H$  对各灾种及其三级指标的危险性进行定量分析<sup>[4-5]</sup>, 危险性指数  $H \in [0, 5]$ , 其与危险等级对应的关系如表 2 所示.

表 2 危险等级分类  
Table 2 Hazard classifications

危险性指数 $H$	危险等级
[4, 5]	非常高
[3, 4]	较高
[2, 3]	中等
[1, 2]	较低
[0, 1]	非常低

设综合管廊可能发生的灾害种类有  $m$  种, 每一种灾害的危险性系数为  $H_i$ , 计算公式如下:

$$H_i = \sum_{i=1}^m \omega_{ij} \times H_{ij} .$$

(1)

其中:  $i=1, 2, \cdots, m; j=1, 2, \cdots, n; m$  为灾害种类,  $n$  为每种灾害对应的指标数;  $H_{ij}$  为第  $i$  种灾害下第  $j$  个指标的危险性系数;  $\omega_{ij}$  为第  $i$  种灾害下第  $j$

个指标所对应的权重.

以地震对管廊造成的破坏为例进行危险性指数分析计算, 其下一级指标对应的危险性系数如表 3 所示.

表 3 地震灾害对应指标危险性系数  
Table 2 Hazard coefficients for the corresponding indexes of earthquake disaster

指标	危险性系数
断裂构造	4. 8
反应位移	4. 2
结构埋深	3. 4
地震加速度	2. 5

### 2. 1 三级指标权重计算

使用 1 ~ 9 标度体系对各指标的重要性进行比较, 建立判断矩阵, 见表 4.

表 4 地震灾害对应指标判断矩阵  
Table 4 Judgment matrix of the corresponding indexes for earthquake disaster

指标	断裂构造	反应位移	结构埋深	地震加速度
断裂构造	1	2	4	5
反应位移	1/2	1	3	4
结构埋深	1/4	1/3	1	3
地震加速度	1/5	1/4	1/3	1

用方根法计算判断矩阵的最大特征根及对应

的特征向量,特征向量就代表了各指标对待评价系统影响程度大小的权重<sup>[6-7]</sup>.其计算步骤:

计算判断矩阵每一行指标的乘积:

$$M_i=\prod_{j=1}^nx_{ij}(i=1,2,\cdots,n).$$

(2)

计算  $M_i$  的  $n$  次方根:

$$\overline{W_i}=\sqrt[n]{M_i}.$$

(3)

确定权重:

$$W_i=\overline{W_i}/\sum_{i=1}^n\overline{W_i}.$$

(4)

计算最大特征根:

$$\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\frac{(\text{BW})_i}{W_i}.$$

(5)

式中,  $\text{BW}=\begin{bmatrix}x_{11}&\cdots&x_{1n}\\\vdots&&\vdots\\x_{m1}&\cdots&x_{mn}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}W_1\\\vdots\\W_n\end{bmatrix}.$

一致性检验:

$$\text{CR}=\frac{\lambda_{\max}-n}{(n-1)\text{RI}}.$$

(6)

式中:CR 为随机一致性比例,当  $\text{CR}<0.1$  时,可认为判断矩阵的一致性指标满足要求; $n$  为矩阵阶数;RI 为随机一致性指标,见表 5.

表 5 平均随机一致性指标

Table 5 Average random consistency index

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6
RI	0	0	0.58	0.89	1.12	1.26

2.2 单一灾种危险性指数

对地震灾害的分析计算结果如表 6 所示.

表 6 计算数据一览表  
Table 6 Calculation results

参数	$M_i$	$W_i$	特征 向量 $\boldsymbol{W}$	最大 (BW) <sub><math>i</math></sub> 特征根 $\lambda_{\max}$
断裂构造	40	2.51	0.49	2.00
反应位移	6	1.57	0.30	1.25
结构埋深	1/4	0.71	0.14	0.57
地震加速度	1/60	0.36	0.07	0.29

由  $\text{CR}=\frac{\lambda_{\max}-n}{(n-1)\text{RI}}=\frac{4.128-4}{(4-1)\times0.89}=0.048<0.1$ ,可知满足一致性要求,即认为权重计算结果合理.

将地震灾害对应指标危险性系数和各指标权重代入公式(1),得到地震造成管廊破坏的危险指数  $H_{\text{地震}}=4.26$ .

对于综合管廊及其内部管线可能发生的爆

炸、火灾、气体泄漏致人中毒以及结构不均匀沉降等灾害,分析计算其危险性指数,结果见表 7.

表 7 单一灾种危险性指数  
Table 7 Hazard indexes for the single disaster

灾害种类	危险性指数
爆炸	4.30
地震	4.26
火灾	4.25
中毒	4.15
不均匀沉降	3.90

3 多灾种耦合度确定

本文采用灰色理论来获取综合管廊多灾种之间的耦合度<sup>[8-9]</sup>,令  $d_{ij}$  为二级指标  $F_i$  对应的三级耦合度指标  $F_{ij}$  的原始数值,用矩阵表示为

$$\boldsymbol{D}_i=(d_{i1},d_{i2},\cdots,d_{in})^{\text{T}}.$$

(7)

式中: $\boldsymbol{D}_i$  表示第  $i$  个二级指标的初始向量; $d_{ij}$  表示第  $i$  个二级指标中第  $j$  个三级指标原始数值; $n$  表示二级指标中含有的三级指标的数量.

3.1 耦合度指标综合指数

由于指标体系中可能包含定量和定性指标,为了消除量纲对向量的影响,可对矩阵进行标准化处理,得到各评价指标的标准矩阵.

设  $d_{ij}^{\max}$  为二级指标  $F_i$  对应的三级指标  $F_{ij}$  的最优值,则

$$\boldsymbol{D}_i^{\max}=(d_{i1}^{\max},d_{i2}^{\max},\cdots,d_{in}^{\max})^{\text{T}}.$$

(8)

其中, $\boldsymbol{D}_i^{\max}$  为二级耦合度指标的最优向量.

以  $\boldsymbol{D}_i$  为被比较向量,以  $\boldsymbol{D}_i^{\max}$  为参考向量,则三级指标和最优指标之间的关联度计算式为

$$\lambda_{ij}=\frac{\min|d_{ik}-d_{ik}^{\max}|+\rho\max|d_{ik}-d_{ik}^{\max}|}{|d_{ik}-d_{ik}^{\max}|+\rho\max|d_{ik}-d_{ik}^{\max}|}.$$

(9)

式中: $\lambda_{ij}$  为三级耦合度指标  $F_{ij}$  的实际值与最优值的关联系数; $k$  为三级耦合度指标的序数, $k=1,2,\cdots,n$ ; $\rho$  表示分辨系数,一般取  $\rho=0.5$ ;min 和 max 分别表示取小值函数和取大值函数.

三级指标的耦合度评价矩阵为

$$\boldsymbol{P}_i=(\lambda_{i1},\lambda_{i2},\cdots,\lambda_{in})^{\text{T}}.$$

(10)

三级指标  $F_{ij}$  的最优值取 10 分,然后对三级指标进行赋值,并计算关联度,结果见表 8.

计算耦合度指标的综合指数:

$$\boldsymbol{X}_i=\boldsymbol{W}^{\text{T}}\boldsymbol{P}_i.$$

(11)

式中: $\boldsymbol{X}_i$  表示二级指标的综合指数; $\boldsymbol{W}$  为特征向量.

表 8 各灾种下三级指标关联度				
Table 8 Relevancy between corresponding indexes				
序号	二级指标	三级指标	原始数值	关联度 $\lambda$
1	地震	断裂构造	8.1	1.00
2		结构埋深	6.8	0.74
3		最大地层位移	7.8	0.93
4		峰值加速度	6.3	0.68
5	不均匀沉降	灾害点密度	6.9	1.00
6		标准段长度	6.5	0.93
7		土体压缩性	6.8	0.98
8		地下水水位	5.9	0.84
9	爆炸	气体泄漏量	6.9	0.81
10		热辐射	7.8	1.00
11		冲击波	7.6	0.95
12		碎片数量	6.9	0.81
13	火灾	高温烟尘	6.8	0.83
14		热辐射	6.1	0.73
15		气体泄漏量	7.7	1.00
16		灼烧时间	6.7	0.81
17	中毒	气体浓度	5.9	0.80
18		毒性级别	6.6	0.91
19		接触时间	6.3	0.86
20		窒息	7.1	1.00

得到各灾种耦合的综合指数,见表 9.

表 9 各灾种耦合度指标的综合指数	
Table 9 Comprehensive indexes of the coupled index for each disaster	
灾害种类	综合指数
地震	0.90
不均匀沉降	0.96
爆炸	0.89
火灾	0.83
中毒	0.86

3.2 构造功效函数

假设变量  $u_i$  是灾害系统的序参量,而  $u_{ij}$  为第  $i$  个序参量的第  $j$  个指标,其值为  $X_{ij}$ .  $\alpha_{ij}, \beta_{ij}$  分别为系统稳定时第  $i$  个序参量的第  $j$  个指标的上下限值. 对于综合管廊多灾耦合系统,其耦合度指标的功效函数可表示为

$$u_{ij} = \frac{X_{ij} - \beta_{ij}}{\alpha_{ij} - \beta_{ij}}, X_{ij} \text{具有正功效}; \tag{12}$$

$$u_{ij} = \frac{\alpha_{ij} - X_{ij}}{\alpha_{ij} - \beta_{ij}}, X_{ij} \text{具有负功效}. \tag{13}$$

式中  $u_{ij}$  为指标对系统的有序度的功效,即指标对灾害系统功能实现的贡献程度,  $u_{ij} \in [0, 1]$ .

当  $u_{ij} = 0$  时为系统之间一致性最差,灾害系统各指标没能达到系统的满意度;当  $u_{ij} = 1$  时一致性最好,各指标完全达到了预定的满意度;当

$0 < u_{ij} < 1$  时,随着值的增大,指标达到目标时越满意,随着值的减小,指标实现目标也就越困难.

本文采取理想情况下评判指数可以达到的上下限值,即  $\alpha_{ij} = 1, \beta_{ij} = 0$ , 计算结果见表 10.

表 10 效用值计算结果	
Table 10 Calculation results of the utility value	
灾害种类	效用值
地震	0.90
不均匀沉降	0.96
爆炸	0.89
火灾	0.83
中毒	0.86

3.3 构建耦合度函数

采用物理学领域的容量耦合概念和耦合系数的模型<sup>[10]</sup>,可分别确定两个系统以及多个系统耦合时的耦合度计算模型.

任意两个系统耦合度公式:

$$C_{ij} = \left[ \frac{U_i U_j}{(U_i + U_j)^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \tag{14}$$

多个系统耦合度公式:

$$C = \sqrt[m]{\frac{U_1 U_2 \cdots U_m}{\prod_{j=1}^m \left[ \prod_{i \neq j}^m (U_i + U_j) \right]}}. \tag{15}$$

其中  $C$  为整个系统的耦合度,系统间的耦合度取值范围  $C \in [0, 1]$ .

综合管廊基于爆炸、火灾、气体泄漏致人中毒以及结构不均匀沉降或在地震作用下发生破坏,5 种灾害的耦合度  $C = 0.09$ ,表明 5 种灾害同时发生的可能性较小,分别计算各灾种两两之间的耦合度,并进行排序比较,结果见表 11.

表 11 灾害耦合度		
Table 11 Disaster coupling degree		
耦合灾害	耦合度	耦合度 $\times 10^3$
地震、爆炸	0.499 978	499.978 1
爆炸、中毒	0.499 923	499.923 1
火灾、中毒	0.499 923	499.922 7
地震、中毒	0.499 819	499.819 1
地震、沉降	0.499 743	499.742 9
爆炸、火灾	0.499 692	499.691 8
沉降、爆炸	0.499 571	499.571 0
地震、火灾	0.499 506	499.505 6
沉降、中毒	0.499 132	499.131 7
沉降、火灾	0.498 338	498.338 2

由表 11 可以得出:灾种之间两两耦合后耦合度差别较小,其中地震、爆炸的耦合度相对较高,不均匀沉降、火灾的耦合度相对较低.

4 多灾耦合致灾风险评价

在单一灾种的危险性和不同灾害之间耦合度



的基础上<sup>[11]</sup>,提出多灾耦合致灾的风险评价方法,对于单一灾种的危险性指数 $H_i$ ,根据灾害耦合情况,引入 $\Delta H$ 来表征耦合灾害对危险性指数的影响,故多灾耦合致灾的危险性指数可表示为

$$H_{12\cdots n}=\max H_i+\Delta H.$$

(16)

其中 $\Delta H_i$ 为耦合灾害影响系数,当 $n$ 种灾害耦合时( $H_1>\cdots>H_n$ ), $\Delta H=(H_1+\cdots+H_n)C_{ab}$ , $\max H_i=H_1$ .

以爆炸、地震耦合为例进行分析.爆炸的危险性指数 $H_1=4.3$ ,地震的危险性指数 $H_2=4.26$ ,爆炸地震的耦合度 $C_{12}=0.499$ .则耦合灾害影响系数 $\Delta H_{12}=(H_1+H_2)C_{12}=(4.3+4.26)\times 0.499=4.27$ ,爆炸和地震灾害耦合的危险性指数 $H_{12}=H_1+\Delta H=4.3+4.27=8.58$ .管廊结构不均匀沉降和火灾耦合的危险性指数为8.31.

在不同灾种耦合的情况下,选取几组有代表性的灾害进行风险分析,结果汇总见表12.

表 12 多灾耦合致灾危险指数

Table 12 Multi-disaster coupled hazard index

耦合情况	灾害种类	耦合度	危险指数
双灾耦合	地震、爆炸	0.499	8.58
	火灾、沉降	0.498	8.31
三灾耦合	爆炸、地震、火灾	0.286	7.97
	沉降、火灾、中毒	0.283	7.73
四灾耦合	爆炸、地震、火灾、中毒	0.165	7.10
	沉降、火灾、中毒、爆炸	0.16	6.95
五灾耦合	爆炸、地震、火灾、中毒、沉降	0.09	6.16

由表12可以看出,综合管廊耦合灾害种类增加时,其危险性递减.这是因为灾害耦合度与灾害耦合数量呈反比关系,即灾害种类越多,其耦合度越低,灾害发生的可能性越小,故其危险指数递减.综合管廊发生爆炸、火灾、气体泄漏致人中毒以及结构不均匀沉降或在地震作用下发生破坏5种灾害耦合的危险性指数为6.16,低于双灾耦合致灾的危险性,但高于任何单一灾种的危险性.

## 5 结 论

本文以包头市新都中心区综合管廊为研究对象,提出一种多灾耦合致灾风险评价方法,在单一

灾种危险指数基础上,建立多灾耦合度模型,求出不同灾种的耦合度.引入多灾耦合影响系数来表征灾种耦合对综合管廊灾害的影响,用多灾耦合后的危险指数表征综合管廊发生灾害的风险.

经过对综合管廊多灾耦合危险指数的比较发现,灾害耦合后,其危险性远大于单一灾害的危险性,但当耦合灾害种类为两种以上时,随着灾种的增加,耦合危险指数有所下降,原因在于两种以上灾害耦合致灾发生的可能性减小,其对应的风险也相应变小.

## 参考文献:

[ 1 ] 侯文帅.地下管廊结构地震动力响应及抗震性能研究 [ D ]. 沈阳:东北大学,2017.  
(Hou Wen-shuai. Reserch on seismic dynamic response and seismic performance of underground utility tunnel [ D ]. Shenyang:Northeastern University,2017. )

[ 2 ] Bell R, Glade T. Multi-hazard analysis in natural risk assessments[ J ]. *Risk Analysis*,2004,9:197-206.

[ 3 ] Kappes M S, Gruber K, Frigerio S, et al. The multiRISK platform: The technical concept and application of a regional-scale multihazard exposure analysis tool [ J ]. *Geomorphology*,2012,151/152:139-155.

[ 4 ] Kappes M S, Papathoma-Köhle M, Keiler M. Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology [ J ]. *Applied Geography*,2012,32(2):577-590.

[ 5 ] Hunt D V L, Nash D, Rogers C D F. Sustainable utility placement via multi-utility tunnels [ J ]. *Tunneling and Underground Space Technology*,2014,39:15-26.

[ 6 ] Pellet-Beaucour A L, Kastner R. Experimental and analytical study of friction force during microtunneling operations[ J ]. *Tunneling and Underground Space Technology*,2002,17(1):83-97.

[ 7 ] Suffo M, Nebot E. Evolution of the chemical-environmental risk of territorial compatibility under the framework of the Seveso Directive: A case study of the autonomous community of Andalusia ( southern Spain ) [ J ]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*,2015,34:177-190.

[ 8 ] Krauthammer T, Chen Y. Soil-structure interface effects on dynamic interaction analysis of reinforced concrete lifelines[ J ]. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*,1989,8:32-42.

[ 9 ] Borja R I, Armies A P. Multiaxial cyclic plasticity model for clays [ J ]. *Journal of Geotechnical Engineering*,1994,120(6):1051-1070.

[ 10 ] Wang S H, Ni P P. Application of block theory modeling on spatial block topological identification to rock slope stability analysis [ J ]. *International Journal of Computational Methods*,2014,11(1):903-914.

[ 11 ] Canto-Perello J, Curiel-Esparza J, Calvo V. Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space [ J ]. *Expert Systems with Applications*,2013,40:4707-4714.