

综合管廊风险评估模型研究

赵香山

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 综合管廊承载着保护城市地下管线的重要功能,其安全性和稳定性直接影响城市运行。为科学评估管廊风险,提出了一种基于多因素加权评估法的综合管廊风险评估模型。该模型综合考虑管廊自身参数、外部影响因素和现状监测数据,通过量化评分和权重分配,计算总风险值并划分风险等级,为管廊设计、施工和运维提供决策支持。模型采用线性加权法,通过专家法或层次分析法确定权重,确保模型科学性和适用性。模型可广泛应用于管廊规划、施工和运维阶段的风险评估,为城市地下空间安全管理提供科学依据。未来可结合机器学习和大数据技术,进一步优化模型精度和动态适应性。

关键词: 综合管廊;风险评估模型;管廊自身参数;外部影响因素;结构健康监测

中图分类号: TU47

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0317-05

Study on Risk Assessment Model for Utility Tunnels

ZHAO Xiangshan

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The utility tunnel has the important function to protect the urban underground pipelines, and its safety and stability directly affect the operation of cities. To scientifically assess the risks of utility tunnels, a risk assessment model for utility tunnels based on a multi-factor weighted evaluation method is proposed. The model comprehensively takes into account the parameters of the utility tunnel itself, the external influencing factors and the current monitoring data. The total risk value is calculated and the risk levels are classified through quantitative scoring and weight allocation, providing the decision-making support for the design, construction, operation and maintenance of utility tunnels. The model employs a linear weighting method, and the weights are determined by expert methods or the Analytic Hierarchy Process to ensure the scientific nature and applicability of the model. The model can be widely applied to risk assessments during the planning, construction, operation and maintenance stages of utility tunnels, providing a scientific basis for the safety management of urban underground space. In the future, the model can be further optimized in terms of precision and dynamic adaptability by integrating machine learning and big data technologies.

Keywords: utility tunnel; risk assessment model; parameters of utility tunnel itself; external influencing factors; structural health monitoring

0 引言

随着城市化进程的加速,综合管廊的建设与运营的安全性受到广泛关注。综合管廊不仅承载着多种市政管线的集中敷设,还面临着复杂的地质条件、施工干扰以及运维管理等多方面的风险。不均匀沉降可能导致管廊变形缝拉裂,见图1;管廊上方超载可能导致管廊结构顶板裂缝,见图2。发现风险后可对管廊缺陷进行及时修复,变形缝处可进行结构修复见图3。建立科学合理的综合管廊风险评估模型,

对于有效识别、量化和控制风险具有重要意义。



图1 某综合管廊变形缝拉裂图

目前,综合管廊风险评估模型的研究已取得显著进展。常见的评估方法包括模糊层次分析法模型、熵权法结合系统动力学模型、贝叶斯网络模型、灰色关联理论模型、图论-AHP^[1]等管廊灾害影响评价方法。这些方法从不同角度对综合管廊的风险因

收稿日期: 2025-03-27

作者简介: 赵香山(1991—),女,硕士,高级工程师,从事市政工程结构设计工作。

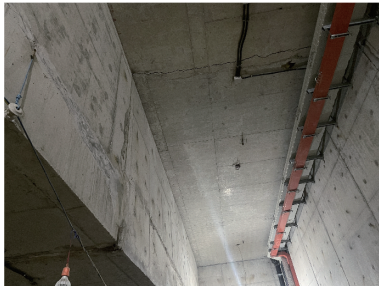


图2 某综合管廊顶板裂缝图



图3 某综合管廊变形缝修复图

素进行了量化分析,为风险管理提供了理论支持。

1 内部因素

综合管廊风险评估模型的建立需要综合考虑管廊自身参数和外部影响因素。管廊参数包括管廊类型,即干线管廊或支线管廊、管廊标准横断面面积、管廊内容纳管线种类,电力、信息、给水、燃气等、管廊所处的地基基础性质等;外部影响因素则涵盖基坑开挖、打桩、交叉穿越和超载等。

基于不同影响因素的风险程度,系统识别综合管廊的潜在风险因素,针对不同区域和施工阶段,识别施工风险、运维风险以及地质灾害风险。基于熵权法法对风险因素进行权重分配,降低风险因素之间的相关性。采用模糊综合评价法或概率对偶犹豫模糊集对风险因素进行量化,计算各风险因素的权重和综合风险值。建立风险评估公式后,根据风险值计算结果,将风险等级划分为低风险、中风险和高风险。

使用模型的过程中,可结合实时监测数据,动态调整风险评估模型的输入参数,确保评估结果的时效性和准确性。风险评估公式如下:

$$R = \alpha \cdot \left(\sum_{i=1}^4 W_i \cdot S_i \right) + \beta \cdot \left(\sum_{j=1}^5 W_j \cdot E_j \right) + \gamma \cdot \left(\sum_{m=1}^5 W_m \cdot F_m \right)$$
$$\alpha + \beta + \gamma = 1$$

(1)

(2)

式中: R 为总风险值,值越大,风险越高; α 为管廊自身参数的权重系数,可取0.4; β 为管廊外部因素的权

重系数,可取0.3; γ 为管廊外部因素的权重系数,可取0.3; W_i 为管廊自身参数的权重值,按表1取值; W_j 为管廊外部参数的权重值,按表2取值; W_m 为管廊自身参数的权重值,按表3取值; S_i 为管廊内部因素参数评分,按表1取值; E_j 为管廊内部因素参数评分,按表2取值; F_i 为管廊现状监测数据参数评分,按表3取值。

表1 内部因素评价项目分值表

内部因素评价项目	描述	分值
管廊类型 $W_1=0.2$	干线	1
	支线	0.5
舱室数量 $W_2=0.2$	单舱	1
	双舱	0.8
	三舱	0.6
管线种类廊内管线分值取和 $W_3=0.3$	燃气	0.2
	电力	0.2
	供水	0.2
	热力	0.2
	通信	0.1
	排水	0.1
	不良地质	1
管廊所在地基 $W_4=0.3$	常规地质	0.6
	良好地质	0.2

表2 外部因素评价项目分值表

外部因素评价项目	描述	分值
临近管廊打桩 $W_1=0.2$	距离管廊大于 50 m	0.2
	10 m < 距离管廊不大于 50 m	0.6
	距离管廊不大于 10 m	1
交叉穿越管廊 $W_2=0.2$	上穿管廊	0.5
	下穿管廊	1
临近管廊开挖基坑 $W_3=0.2$	开挖深度不大于 7 m	0.2
	7 m < 开挖深度不大于 12 m	0.6
	开挖深度大于 12 m	1
	距离管廊大于 3 倍基坑深度	0.4
	2 倍基坑深度 < 距离管廊不大于 3 倍基坑深度	0.6
	1 倍基坑深度 < 距离管廊不大于 2 倍基坑深度	0.8
	距离管廊不大于 1 倍基坑深度	1
管廊影响范围内 超载 $W_4=0.2$	超载不大于 20 kPa	0
	20 kPa < 超载不大于 30 kPa	0.5
	30 kPa < 超载不大于 40 kPa	1
自然灾害 $W_5=0.2$	地震	1
	火灾	0.6
	洪水	0.2

2 内部因素分类及评级

2.1 干线或支线

干线管廊作为城市能源和信息输送的主通道,

表 3 现状监测数据评价项目分值表

监测数据评价项目	描述	分值
不均匀沉降 $W_1=0.2$	监测数据不大于 10 mm	0.2
	10 mm<监测数据不大于 12 mm	0.6
	12 mm<监测数据不大于 15 mm	1
倾斜 $W_2=0.2$	监测数据不大于 0.17%	0.2
	0.17%<监测数据不大于 0.2%	0.6
	0.2%<监测数据不大于 0.25%	1
裂缝 $W_3=0.2$	监测数据不大于 0.14 mm	0.2
	0.14 mm<监测数据不大于 0.16 mm	0.6
	0.16 mm<监测数据不大于 0.2 mm	1
断面收敛 $W_4=0.2$	监测数据不大于 0.14 mm/m	0.2
	0.14 mm/m<监测数据不大于 0.16 mm/m	0.6
	0.16 mm/m<监测数据不大于 0.2 mm/m	1
振动 $W_5=0.2$	监测数据不大于 0.35g	0.2
	0.35g<监测数据不大于 0.4g	0.6
	0.4g<监测数据不大于 0.5g	1

承担着供水、供电、供气等管线的容纳任务,保障城市正常运转。一旦发生泄漏、爆炸等事故,将导致大范围停水、停电、停气,干线管廊建设成本高,内部管线价值昂贵,受损后修复成本高,停运还会造成大量间接经济损失。由于管廊内管线种类多、压力大,若管理不善或维护不到位,有风险引发火灾等风险,对设施安全造成威胁。

支线管廊连接干线管廊与用户端,负责将资源输送至具体使用点。内部管线管径较小、管线压力及等级较低,内部管线出现问题时,会导致区域性的停电、停气、停水等。风险小于干线管廊,但仍存在火灾、泄漏等隐患,可能对周边环境和居民生活造成影响。

根据干线和支线的重要性,确定其分值排序为:干线>支线。

2.2 管廊的舱室数量

管廊为线性工程,由于其刚度较小,不均匀外部荷载往往对管廊有较大影响。通过研究在机动车动荷载下地下综合管廊的应力^[2],在相同条件下,三舱管廊的应力更小,抗疲劳更有利。

根据不同舱室管廊的抗风险能力,确定其分值排序为:单舱>双舱>三舱。

2.3 容纳管线种类

管廊本身作为钢筋混凝土结构,可保障内部管线在灾害下受损较小,能够更快地恢复运行。管廊内的市政管线种类有燃气、电力、给水、通信、排水、供冷供热等。

燃气管线为居民提供燃气,满足居民的烹饪、取

暖等生活需求,燃气管线在泄露时有爆炸风险,危险等级高。电力管线将发电厂产生的电能输送到城市的各个角落,为城市的发展和居民生活提供动力。给水管线将水源地或水厂的清水输送到千家万户,保障城市居民的生活用水。热力管线在冬季为居民区和工业区输送热能,提供温暖的供暖。重要性较高。

通信管线包括电信、有线电视、互联网等信息传输管线,保障城市的信息畅通,支持城市的通信、金融、交通等系统的正常运行。排水管线收集和输送城市雨污水,防止城市内涝和水体污染。重要性较低。

根据不同市政管线的重要性,确定其分值排序为:燃气、电力、给水、供冷供热>通信、排水。

2.4 地质情况

非均匀地层会导致综合管廊结构发生不均匀沉降,使管廊管节之间的竖向剪应力显著增加,管节之间产生较大的轴向应力,易发生张拉破坏。随着时间推移,管廊变形缝两侧结构的错动和轴向应力会进一步增大,增加破损、漏水、漏砂的风险。基岩坡度较大的地层中,管廊的轴向应力分布不均匀,两端顶板和底板的应力变化显著,可能导致结构裂缝或漏水。软弱土层压缩性越大,地基沉降越大,管廊的纵向弯曲变形越明显,轴向应力和沉降位移差异也越大。

根据土层性质,将管廊所在地基土性质分为:不良地质:包含非均匀地层、基岩、软弱性土,如淤泥、淤泥质土、软黏土;常规土层,即中压缩性土,如粉土、一般黏土、软岩;较好土层,即均匀的低压缩性土,如砂土、砾石土、硬黏土,并确定对应的评级参数。

根据不同地基土层性质对管廊的影响,确定其分值排序为:不良地质>常规地质>良好地质。

综合管廊内部因素分类及评级分值见表1。

3 外部因素分类及评级

综合管廊常见于城市内开发程度较高的区域,管廊建设完成后,在管廊的安全控制范围内工程建设的案例越来越多的情况。其中,对管廊影响较大的施工扰动有临近管廊打挤土桩、深基坑开挖、穿越管廊、超载等。

3.1 挤土桩施工

在挤土桩的施工过程中,由于桩周土体被大量

挤密或挤开,土体的原始结构受到严重扰动和破坏,通常会产生土体的浅层及深层侧移^[3]。在挤土效应下,管廊的两侧侧墙的弯矩明显增长,管廊纵向也产生了挠曲^[4]。浅层挤土效应引起管廊向远离桩基方向的侧向位移,深层挤土效应导致管廊抬升。桩基施工时不均匀性及非连续性导致线形管廊不均匀侧移及抬升,进而导致变形缝拉断导致漏水,管线变形、泄露、甚至爆管,管廊结构会出现裂缝、变形、甚至断裂。

3.2 交叉穿越

通过有限差分法模拟盾构下穿现状管廊的施工过程^[5],在注浆压力不变时,上下隧道的角度增加会导致轴线焦点附近的沉降值增加、影响范围的减小。基于大直径顶管上穿下方盾构隧道的模型模拟^[6],提出了现状隧道位移与弯矩的简化计算方法。基于现状综合管廊下方浅埋暗挖隧道施工的监测数据的分析,提出了保障管廊安全的施工措施建议^[7]。通过有限元软件模拟顶管施工下穿现状综合管廊^[8],顶管下穿现状综合管廊时影响较大,顶管上穿现状综合管廊时影响较小,管廊的形变量在顶管施工完成后达到最大。

3.3 深基坑施工

深基坑施工会引起周边土体沉降及位移,从而导致管廊主体沉降、变形、位移。当变形缝两侧产生不均匀沉降及位移时,变形缝可能出现拉裂漏水等情况。当内部管线的支墩或支架产生不均匀沉降及位移时,管线可能产生额外的应力,甚至会造成爆管等重大后果。当管廊地基为多砂土质^[9]时,临近深基坑开挖需格外注意。三维有限元分析模型的模拟^[10]表明基坑距离现状综合管廊的距离越小,现状管廊受影响的程度越大。

3.4 超载

超载指管廊附近的地面或地下区域承受超过设计荷载的外部压力或重量,由临时堆载、重型车辆通行、建筑物施工或其他外部活动引起。超载导致管廊周边土体发生不均匀沉降,进而引起管廊结构的变形或开裂。超载会使管廊结构承受额外的应力,可能导致局部应力集中,进而引发裂缝或结构破坏。对于预制拼装管廊,超载可能导致管节接头松动或错位,影响管廊的整体稳定性。超载增加管廊周边土体的压缩变形,导致管廊基础下沉或倾斜。在饱和砂土或粉土地层中,超载引发土体液化,导致管廊失稳或上浮。管廊位于边坡附近时,超载可能诱发

边坡滑移或坍塌,进而威胁管廊安全。

3.5 自然灾害因素

自然灾害包含地震、火灾、洪水等。自 1964 年以来,管廊因为地震导致的后果有:砂土液化、管廊整体上浮、沙土流入管廊内部,土体侧向位移过大、管廊整体剪断,燃气管道爆炸、管廊主体结构损坏等^[11]。甘霖等^[12]在考虑接头影响前提下,对综合管廊标准段在地震响应进行了分析。刘智等^[13]基于 IDA,建立了一种管廊在纵向地震下的易损性分析方法。许成顺等研究了综合管廊预制拼装接口在斜入射的 SV 波下的相应规律^[14]。地震导致标准断面结构弯剪破坏,节点受弯破坏,内部的市政管线接头扭伤或拉伤、管线支架变形脱落。火灾导致综合管廊内部起火,管线功能受损,供电通信受损,甚至引发爆炸^[15]。洪水致使导致管廊周围土体松动,管廊变形、坍塌。根据不同自然灾害对管廊的影响,确定其分值排序为:地震>火灾>洪水。

综合管廊外部因素分类及评级分值见表 2。

4 管廊现状监测数据评级

综合管廊在建设和运营过程中累积了现状风险。管廊的结构健康监测系统的常规监测内容包括不均匀沉降、倾斜、裂缝、断面收敛等,监测系统以数据的形式反应这些变形,可作为管廊安全评价的一部分。测点布置示意图见图 4,结构健康监测安装见图 5。

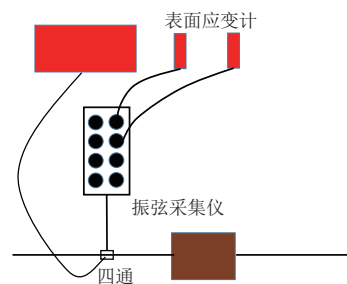


图 4 测点布置示意图



图 5 管廊内监测设备安装图

综合管廊现状监测数据评级分值见表 3。

5 应对措施

$R \leq 0.4$ 时判定为低风险, $0.4 < R \leq 0.7$ 时判定为中风险, $R > 0.7$ 时为高风险。针对不同风险程度, 确定具体的应对措施如下。

5.1 低风险应对措施

加强日常监测: 定期对管廊进行巡查和监测, 及时发现并处理潜在问题。完善维护计划: 制定合理的维护计划, 对管廊进行定期维护和保养。

5.2 中风险应对措施

进行专项检查: 针对风险因素进行专项检查和评估, 制定相应的整改措施。加强防护措施: 对管廊进行加固、防腐等防护措施, 提高其抗灾能力。编制针对中风险的应急预案, 明确应急响应流程和措施。

5.3 高风险应对措施

立即采取应急措施: 对高风险区域进行紧急处理, 如暂停使用、疏散人员等。进行风险评估和治理: 对高风险因素进行深入评估和治理, 采取必要的工程措施和技术手段, 降低风险。加强应急管理: 编制完善的应急管理流程, 提高应急响应能力和处置效率。

6 结 论

综合管廊结构风险源辨识与分级是保障其安全运行的重要环节, 基于管廊的自身特性及外部影响因素, 提出了风险评估理论公式, 并根据风险分类提出了建议措施。为现状管廊或临近管廊施工时可能对管廊造成的影响程度提出了可量化的风险测算方式。

现有研究通过多种方法和技术手段, 为综合管廊特定状态下的风险定量评价提供了可操作的理论

支持。下一步可研究如何在复杂地质和环境条件下精准识别风险源。结合土木工程、安全科学和信息技术, 构建更加完善的综合管廊风险评估体系。

参考文献:

- [1] 张召冉, 于天富, 项方备, 等. 基于图论-AHP管廊灾害影响评价及减灾分析[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(2): 217-224.
- [2] 施有志, 阮建凑, 林树枝, 等. 机动车荷载对地下综合管廊的影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(3): 62-71.
- [3] 张启瑞, 商奇, 卫佳琦, 等. 软土地区大直径静压桩挤土影响防治措施应用实践[C]//第十九届全国岩土工程测试学术大会、第六届工程监测技术大会论文集. 2024.
- [4] 张耀东. 预制桩沉桩施工对临近综合管廊的影响[J]. 公路, 2018, 63(5): 228-232.
- [5] 熊志浩, 张路, 周晓涵, 等. 地铁盾构区间隧道近接下穿城市综合管廊影响分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(9): 135-139.
- [6] 姚言, 王奎华, 应宏伟, 等. 考虑上浮效应的顶管施工引起下方盾构隧道响应简化分析方法[J]. 地基处理, 2024(3): 18-26.
- [7] 刘慧芬, 程春香, 吴朵. 浅埋暗挖隧道下穿综合管廊施工技术研究[J]. 地基处理, 2021, 3(1): 76-81.
- [8] 陈秋活. 顶管法下穿既有综合管廊影响分析[J]. 广州建筑, 2024, 52(9): 33-37.
- [9] 孔令宇, 杨铮, 彭渤, 等. 多砂土质深基坑开挖对邻近地下综合管廊结构影响研究[J]. 城市住宅, 2021, 28(12): 231-234.
- [10] 林鼎宗, 蔡奇鹏, 黄翀, 等. 基坑开挖对邻近双舱综合管廊影响的三维数值分析[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1738-1747.
- [11] 郭佳奇, 钱源, 王珍珍, 等. 城市地下综合管廊常见运维灾害及对策研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 27-33.
- [12] 甘霖, 郭恩栋, 金宇航, 等. 考虑接头影响的综合管廊标准段地震响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 201-209.
- [13] 刘智, 郭恩栋, 胡亚楠, 等. 基于IDA方法的综合管廊纵向地震易损性分析研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(9): 1-13.
- [14] 许成顺, 胡正一, 史跃波, 等. SV波斜入射下预制拼装式综合管廊接口的地震响应规律[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(12): 1215-1225.
- [15] 黄萍, 林秋晖. 基于AHP-证据理论的综合管廊火灾安全评价[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 1-8.