文章编号:1674-2974(2026)03-0139-15 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026032

# 典型交通枢纽建筑震后功能损失评价方法研究

蒋欢军[1,2†],周闽龙[1,2],施嘉豪[1,2]
(1. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室,上海 200092;
2. 同济大学 土木工程学院,上海 200092)

**摘 要**:与一般建筑相比,交通枢纽建筑作为城市交通网络的核心节点,具有规模庞大、功能组成复杂等特点.为解决现有的震后功能损失评价方法缺乏针对性的问题,提出了一种基于构件功能组装的典型交通枢纽建筑震后功能损失评价方法.考虑到构件功能损失的不确定性,建立了构件损伤状态与功能损失的映射关系.利用模糊算子建立了客运汽车站的楼层功能损失逻辑树模型.考虑楼层间的功能关联性,引入TrueSkill算法计算重要性权重系数,建立了从楼层到建筑整体的功能损失量化方法.最后,将该方法应用于某三层钢筋混凝土框架结构客运汽车站的震后功能损失评价,验证了本方法的可行性.

**关键词**:功能损失;功能组装;抗震韧性;地震响应
**中图分类号**:TU352.1 **文献标志码**:A

# Study on evaluation method for post-earthquake functional loss of typical transportation hub buildings

JIANG Huanjun[1,2†],ZHOU Minlong[1,2],SHI Jiahao[1,2]
(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract**: Compared with conventional structures, transportation hub buildings, as critical nodes in urban transportation networks, show their large scales and functional complexity. To address the lack of specificity in existing methods for evaluating post-earthquake functional loss, a novel evaluation method based on component functional assembly is proposed for typical transportation hub buildings. Considering the uncertainty in component functional loss, a mapping relationship between damage states and functional loss is established. Logic trees of floor-level functional loss for passenger bus stations are established by applying fuzzy operators. Given the functional correlation between floors, the TrueSkill algorithm is adapted to quantify the importance weight coefficients, and the functional loss quantification from floors to the overall structure is established. Finally, the proposed method is applied to the post-earthquake functional loss assessment of a three-story reinforced concrete frame structure passenger bus station, demonstrating the feasibility of the proposed method.

**Key words**: functional loss; functional assembly; seismic resilience; seismic response

---

* **收稿日期**:2024-12-23
**基金项目**:国家自然科学基金地震科学联合基金资助项目(U2239253), National Natural Science Foundation of China for Earthquake Science(U2239253)
**作者简介**:蒋欢军(1973—),男,浙江诸暨人,同济大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: jhj73@tongji.edu.cn

针对城市建筑震后重建难度高、重建时间长、经济负担重等问题,学者们提出了“抗震韧性”概念,即系统在受到地震影响时维持系统功能,并在震后恢复其原有功能的能力[1]. 作为评估建筑抗震韧性的重要手段,震后功能损失量化可以直观反映建筑震后的实际运行状态,为修复方案的制定和优化提供依据. 交通枢纽建筑作为城市功能网络的核心节点,在提升城市连通性、促进区域经济发展等方面发挥着重要作用. 随着城市化进程的持续推进,地震灾害引发的交通枢纽建筑功能中断问题日益显著. 1995年日本阪神地震中,神户高速线大开站破坏严重,整个功能恢复过程长达一年[2]. 2010年智利地震中,大量非结构构件的破坏导致阿图罗·梅里诺·贝尼特斯准将国际机场因功能丧失而关闭[3]. 2023年土耳其地震中,伊斯肯德伦港因设备受损陷入瘫痪,严重影响了震后救灾活动的展开[4]. 对典型交通枢纽建筑进行震后功能损失评价,不仅能为建筑的抗震韧性评估、抗震设计加固提供数据支持和决策基础,还可以为提升我国防灾减灾能力、建设韧性城市提供参考.

地震作用下建筑内部构件会发生不同程度的损伤,导致构件功能水平下降,进而影响建筑整体功能水平,因此构件震后功能损失量化是建筑整体功能损失评价的基础. 现有研究已建立了多种构件损伤状态与功能损失的映射量化指标,包括基于损伤状态的量化指标[5-6]、基于三角概率分布确定损失比的量化指标[7]、基于直接经济损失的量化指标[8-9]、依据构件损伤情况确定损伤比的量化指标[10]、自定义指数的量化指标[11]以及依据相关文献或规范自定义损伤指数的量化指标[12-13]等. 构件功能组装,即通过一定的方法将各个构件的功能损失组装为建筑子系统的功能损失,并最终集成为建筑整体的功能损失. 基于构件功能组装的震后功能损失评价已广泛应用于不同类型和功能的结构体系中. 卢啸[14]提出了构件按权重集成的整体建筑使用功能损失的表达式. Jiang等[15]将模糊算子引入逻辑树中,建立了基于构件功能组装的建筑震后功能损失量化方法. 故障树模型因其定量评估、可视化表达、兼容性强等特点,被广泛应用于建筑震后功能损失评价中,如办公楼[16]、医院[17]等. 然而,传统的故障树方法采用固定层级结构,难以处理多系统耦合的复杂体系,为此有学者将贝叶斯网络应用于建筑震后功能损失评价,如地铁车站[18]、医院[19]等. 贝叶斯网络虽然能反映多变量间的复杂依赖关系,但仍面临着数据需求量大、模型构建复杂等问题. 目前有关震后功能损失评价的研究多针对功能组成较为单一、规模较小的建筑,且各系统功能间的关联方式较为简单,构件间的功能损失传递较为清晰. 交通枢纽建筑通常规模庞大,内部系统高度耦合,其功能组成与常规建筑存在显著差异. 现有的震后功能损失评价方法难以准确反映交通枢纽建筑的功能特点,评价结果的准确性无法得到保障.

针对上述问题,本文从构件层次开展功能损失分析,并基于逻辑树模型将构件功能损失组装为楼层功能损失、建筑整体功能损失,针对交通枢纽建筑的功能特点提出交通功能损失的量化方法,结合蒙特卡罗法建立了应用于交通枢纽建筑的震后功能损失评价方法.

## 1 构件震后功能损失量化

建筑构件的震后损伤状态用$DS_i$表示,其中$DS_0$、$DS_1$、$DS_2$……$DS_n$($n\geq1$)依次表示构件损伤由轻微到严重,$DS_0$表示完好无损状态,$DS_n$表示完全损坏状态. 地震易损性分析从概率角度反映了工程结构的抗震性能,在确定构件损伤状态的概率分布模型后,利用蒙特卡罗法在区间[0,1]内生成均匀分布的随机数,模拟构件的损伤状态. Cimellaro等[8]分别采用直线型、指数型和三角函数型功能恢复函数描述系统的功能恢复过程. 本研究根据功能恢复曲线假定功能损失(functional loss,FL)与损伤状态(damage state,DS)的映射关系符合三种类型:线性函数、指数函数、三角函数. 考虑到地震作用、构件材料、施工过程等存在不确定性,本研究参考结构全概率抗震性能评估理论,假定构件在给定的损伤状态下对应的功能损失符合对数正态概率分布($\theta$为中值,$\sigma$为对数标准差). 对损伤状态进行归一化处理,如式(1)所示.

$$d_{Si}=\frac{i}{N}\in[0,1]\quad(i=0,1,\cdots,N) \tag{1}$$

式中:$d_{Si}$为第$i$个损伤状态等级下归一化后的构件损伤状态;$d_{S0}$=0和$d_{SN}$=1分别表示完好状态和完全损伤状态.

为建立构件损伤状态与功能损失的映射关系,收集现有研究提出的损伤状态与功能损失的映射量化准则,如表1、表2所示.结构构件的常用指标包括经济损失比[8,20-23]、损伤指数[11,13,24-31]、震害指数[12,32-36]、损伤状态[5,14]、功能完整度[37-38]、结构功能损失比[7,39-40];非结构构件的常用指标则为经济损失比[9,41]、损伤指数[6]、损伤状态[5,14]、非结构功能损失比[7,42-43]、功能完整度[10].将以上数据进行对数正态分布统计处理,得到的统计中值和对数标准差分别如图1、图2所示.为使概率统计结果具有一般性与普适性,分别将中值曲线和对数标准差曲线进行拟合处理,得到拟合曲线模型.

**表1　结构构件在各损伤状态下的功能损失**

**Tab.1　Functional losses of structural components under various damage states**

| 文献 | 功能损失指标 | 损伤状态 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $DS_0$ | $DS_1$ | $DS_2$ | $DS_3$ | $DS_4$ |
| Cimellaro等[8] | 经济损失比 | 0 | 0.1 | 0.3 | 1 | 1 |
| 李文俊[20] | 经济损失比 | 0 | 0.11 | 0.31 | 0.73 | 1 |
| GB/T 18208.4—2011[21] | 经济损失比 | 0.03 | 0.11 | 0.31 | 0.73 | 0.91 |
| Melani等[22] | 经济损失比 | 0 | 0.1 | 0.4 | 1 | 1 |
| Hazus*[23] | 经济损失比 | 0.01 | 0.06 | 0.3 | 0.75 | 1 |
| 陈聪等[13] | 损伤指数 | 0.05 | 0.17 | 0.42 | 0.78 | 1 |
| 欧进萍等*[24] | 损伤指数 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.75 | 0.9 |
| 郑世杰*[25] | 损伤指数 | 0 | 0.15 | 0.5 | 0.85 | 1 |
| 王娜*[26] | 损伤指数 | 0 | 0.15 | 0.5 | 0.85 | 1 |
| 王鼎等*[27] | 损伤指数 | 0 | 0.15 | 0.5 | 0.85 | 1 |
| 支旭东等*[28] | 损伤指数 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.75 | 1 |
| 张天明*[29] | 损伤指数 | 0 | 0.05 | 0.3 | 0.75 | 1 |
| 朱益峰*[30] | 损伤指数 | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.75 | 1 |
| 刘焕芹*[31] | 损伤指数 | 0 | 0.1 | 0.25 | 0.65 | 1 |
| 刘瑞康*[11] | 损伤指数 | 0.11 | 0.31 | 0.59 | 0.82 | 0.92 |
| 徐强等[32] | 震害指数 | 0.05 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.85 |
| 刘伯权等*[33] | 震害指数 | 0.05 | 0.2 | 0.45 | 0.77 | 0.93 |
| 牛荻涛等*[34] | 震害指数 | 0.1 | 0.3 | 0.57 | 0.78 | 0.9 |
| 樊禹江等[12] | 震害指数 | 0.1 | 0.3 | 0.57 | 0.77 | 0.95 |
| 薄景山等[35] | 震害指数 | 0.05 | 0.2 | 0.425 | 0.7 | 0.925 |
| 陈宗平等*[36] | 震害指数 | 0.05 | 0.1 | 0.35 | 0.7 | 1 |
| 丛阳[5] | 损伤状态 | 0 | 0 | 0.33 | 0.67 | 1 |
| 卢啸[14] | 损伤状态 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| 林旭川等[37] | 功能完整度 | 0 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1 |
| 徐娅婷等[38] | 功能完整度 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| 毕可为[39] | 结构功能损失比 | 0 | 0.08 | 0.25 | 0.7 | 0.95 |
| 薛璐[7] | 结构功能损失比 | 0 | 0.1 | 0.5 | 0.9 | 1 |
| 孙龙飞[40] | 结构功能损失比 | 0 | 0.1 | 0.4 | 0.7 | 1 |

注:表中带*的文献数据取对应参数区间的中位数.

结果表明,指数函数能较好地拟合结构构件损伤状态与功能损失中值的映射关系,如式(2)所示.而非结构构件宜采用线性函数进行拟合,如式(3)所示.

$$\theta = \frac{e^{0.68d_{Si}} - 1}{e^{0.68d_{SN}} - 1} \tag{2}$$

$$\theta = \frac{d_{Si} - d_{S0}}{d_{SN} - d_{S0}} \tag{3}$$

对数标准差$\sigma$分别按拟合后的双折线函数取值.其中结构构件功能损失对数标准差与损伤状态的关系如式(4)所示,非结构构件如式(5)所示.

$$\sigma = \begin{cases} 2.03d_{Si}, & 0 \leqslant d_{Si} \leqslant 0.25 \\ -0.677d_{Si} + 0.677, & 0.25 < d_{Si} \leqslant 1 \end{cases} \tag{4}$$

$$\sigma = \begin{cases} 1.161d_{Si}, & 0 \leqslant d_{Si} \leqslant 0.33 \\ -0.572d_{Si} + 0.572, & 0.33 < d_{Si} \leqslant 1 \end{cases} \tag{5}$$

**表 2 非结构构件在各损伤状态下的功能损失**

**Tab.2 Functional losses of non-structural components under various damage states**

| 文献 | 功能损失指标 | 损伤状态 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $DS_0$ | $DS_1$ | $DS_2$ | $DS_3$ |
| 滕睿等[9] | 经济损失比 | 0.11 | 0.31 | 0.73 | 0.91 |
| 陈洪富*[41] | 经济损失比 | 0.1 | 0.25 | 0.60 | 0.85 |
| 宁晓晴[6] | 损伤指数 | 0 | 0.33 | 0.67 | 1 |
| 丛阳[5] | 损伤状态 | 0 | 0.33 | 0.67 | 1 |
| 卢啸[14] | 损伤状态 | 0 | 0.33 | 0.67 | 1 |
| 李钢等[42] | 非结构功能损失比 | 0 | 0.3 | 0.7 | 1 |
| 王晓娜[43] | 非结构功能损失比 | 0.16 | 0.31 | 0.56 | 1 |
| 薛璐[7] | 非结构功能损失比 | 0 | 0.3 | 0.7 | 0.9 |
| 芦燕等[10] | 功能完整度 | 0.01 | 0.1 | 0.33 | 1 |

注:表中带*的文献数据取对应参数区间的中位数.

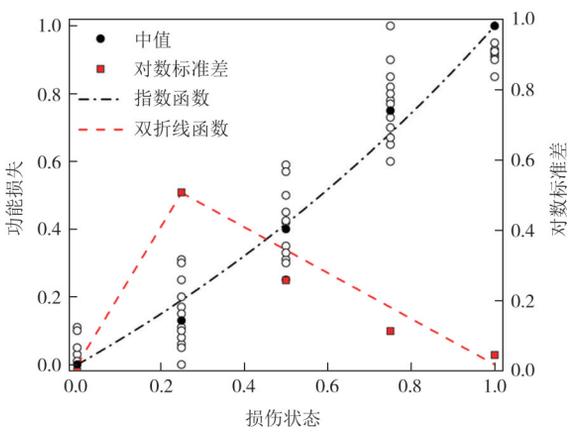



图 1 结构构件统计与拟合

Fig.1 Structural component statistics and fitting

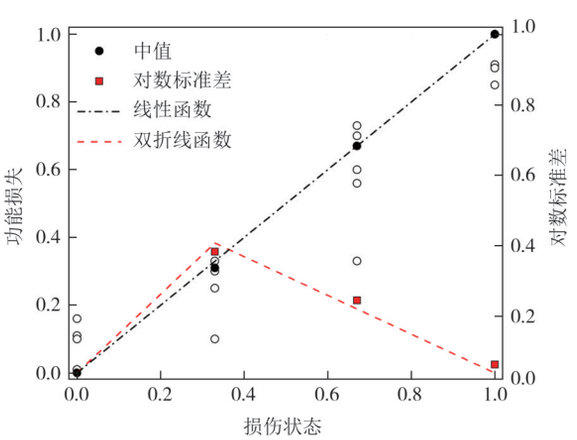



图 2 非结构构件统计与拟合

Fig.2 Non-structural component statistics and fitting

楼层内相同种类构件的功能损失采用求和取平均的方法计算,如式(6)所示[15].

$$L_{p,q}=\frac{1}{n_{p,q}}\sum_{r=1}^{n_{p,q}}L_{p,q,r} \tag{6}$$

式中:$L_{p,q}$为建筑第$p$层第$q$类构件的功能损失;$L_{p,q,r}$为建筑第$p$层第$q$类构件的第$r$个构件的功能损失;$n_{p,q}$为建筑第$p$层第$q$类构件的数量.

## 2 交通枢纽建筑震后功能损失评价

### 2.1 构件联合功能组装

建筑功能按照层级系统可依次划分为建筑总功能、楼层功能、主功能、子功能和构件功能.在一个复杂的建筑结构系统中,不同类型构件之间可能存在多种功能关联方式,通过构件功能组装为建筑提供特定的功能.假定关联方式分为串联、并联和独立三种基本类型.串联构件功能相互依赖,单个构件的损伤会导致联合体系的功能损失.并联构件功能相互冗余,单个构件的损伤不会对体系功能产生显著影响.独立构件之间功能互不相关,各自独立地对联合功能发挥作用.

系统工程常采用模糊算子(fuzzy operators)量化不确定性,以实现不同对象间属性的关联.每种模糊算子均可对原始值进行模糊交运算(T-norm)和模糊并运算(S-norm),联合计算值的取值范围为[0,1].本文采用模糊算子进行构件功能关联,原始值和联合值分别为构件的功能损失值和联合功能损失值,交运算代表构件的并联,并运算代表构件的串联,同时采用平均值计算来代表构件的独立,如表3所示.由于模糊算子具有唯一性、单调性、对称性和关联性,因此联合值与原始值的数值大小、位置顺序等没有相关性.

**表 3 选取关联因子及函数表达式**

**Tab.3 Correlation factors and expression of functions**

| 类型 | 构件间关联方式 | | |
|---|---|---|---|
| | 串联 | 并联 | 独立 |
| 1 | $\max(a,b)$ | $\min(a,b)$ | $(a+b)/2$ |
| 2 | $a+b-ab$ | $ab$ | $(a+b)/2$ |
| 3 | $\left[\min\left(1,a^2+b^2\right)\right]^{\frac{1}{2}}$ | $1-\left[\min\left(1,(1-a)^2+(1-b)^2\right)\right]^{\frac{1}{2}}$ | $(a+b)/2$ |

在交通枢纽建筑中,多种构件相互关联,共同组成某项子功能,如图3所示.子功能之间以及子功能与构件之间通过相互关联构成联合体系,为建筑提供特定功能.例如,水箱与水泵协同工作,组成供水子功能,该子功能进一步与管网系统共同工作,实现楼层给排水主功能.

为体现各个构件的重要性程度,采用权重系数$\omega$反映构件的功能损失对联合体系功能的影响程度

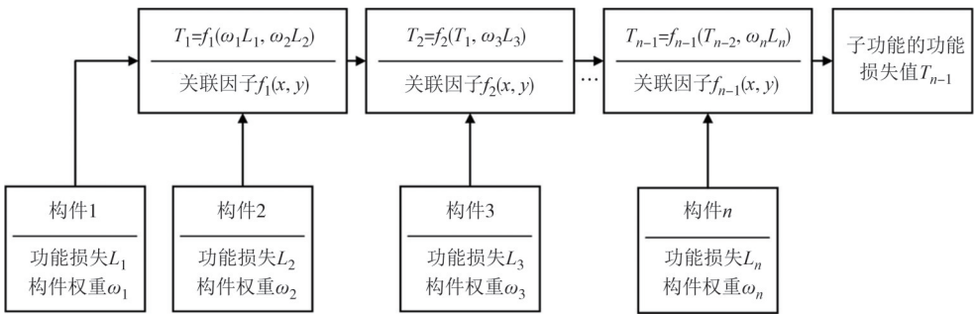



图 3　子功能组装方法

Fig.3　Assembly method of sub-function

大小. 权重系数$\omega$定义为各构件重置费用与构件所在联合体系的总重置费用的比值,如式(7)所示[15]. 结合构件功能损失和权重系数$\omega$,选取能够反映构件功能关联特点的关联因子,即可计算得到子功能的功能损失值.

$$\omega_{j,k}=\frac{Q_{j,k}}{\sum_{k=1}^{m_j}Q_{j,k}} \tag{7}$$

式中:$m_j$为第$j$个联合体系内构件种类数;$Q_{j,k}$为第$j$个联合体系内第$k$类构件的总重置费用.

## 2.2　楼层功能损失量化

交通枢纽建筑的楼层功能由多种子功能组合而成. 基于逻辑树层级结构,通过关联因子将不同类型的子功能组装,得到楼层总功能损失. 楼层功能可分为安全功能、基本功能和高级功能,如图 4 所示. 其中,安全功能负责保障建筑的结构安全和稳定,基本功能负责保障建筑的正常运行,高级功能负责保障交通运输和运营维护等. 由于安全功能和基本功能直接影响建筑的结构安全与正常使用,是楼层高级功能的基础,因此将安全功能和基本功能分别与高级功能进行类型 1 串联处理.

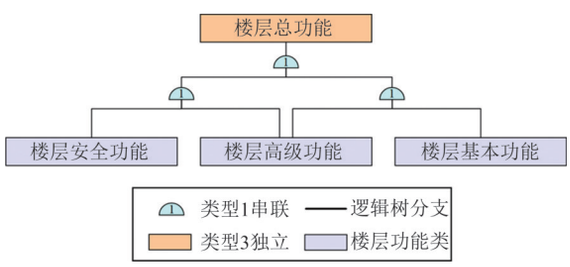



图 4　楼层总功能组装方法

Fig.4　Assembly method of storey total function

### 2.2.1　安全功能与基本功能

楼层的安全功能可分为结构安全和抛落物安全两大功能系统. 结构安全由柱、梁等结构构件组成,抛落物安全则由填充墙、吊顶、屋顶饰面三种非结构构件组成,如图 5 所示. 楼层基本功能指满足供水、供电、供暖、照明等基本需求的能力,因此可以划分

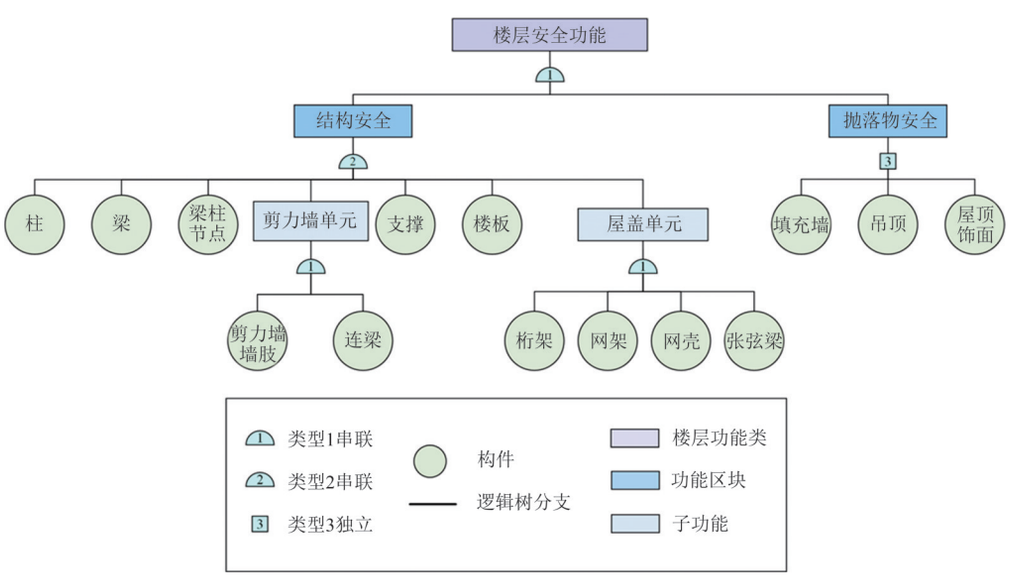



图 5　楼层安全功能组装方法

Fig.5　Assembly method of storey safety function

为空间、给排水、照明和暖通四大功能系统,每个功能系统由对应的构件组成,如图6所示.为了考虑建筑外部资源环境的影响,将水源和电源定义为特殊功能,其功能损失由外部社区供应环境决定.

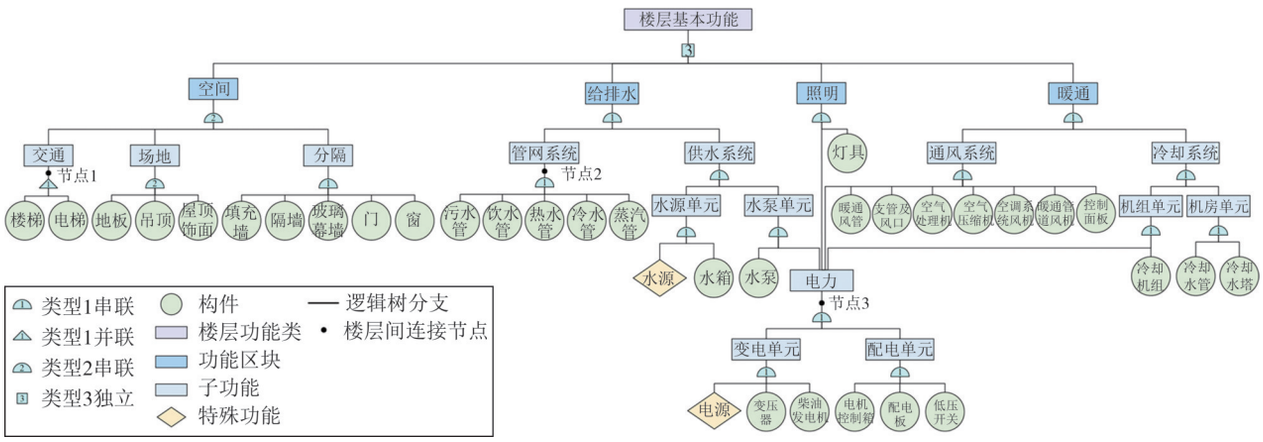



图6 楼层基本功能组装方法

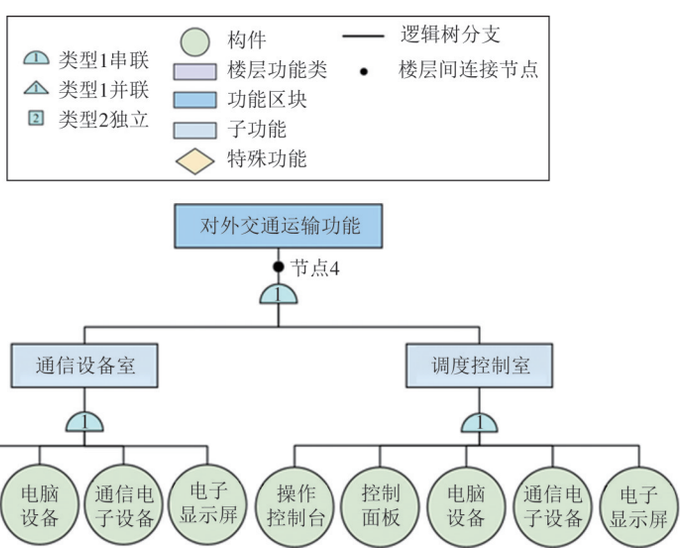
Fig.6 Assembly method of storey basic function

2.2.2 高级功能

楼层高级功能可以划分为对外交通运输、运营维护和旅客交通服务三大功能系统.其中对外交通运输功能负责交通枢纽建筑同其他枢纽节点之间的联系,运营维护功能负责保障交通枢纽的正常运转,旅客交通服务功能则可以划分为旅客服务功能和人员疏散两大子功能,后者影响旅客在交通枢纽建筑内的通行效率.任一功能系统的失效均会导致楼层高级功能失效,因此将楼层高级功能的三个功能系统进行类型1串联处理.

不同类型的交通枢纽建筑在三大功能系统的具体子功能上存在差异,体现了不同的功能需求.因此需要针对不同类型的交通枢纽建筑分别考虑相应的高级功能组装方式.本文以客运汽车站为例,详细阐述楼层高级功能的功能组装方式,如图7所示.客运汽车站的车辆运行效率取决于站台与客车司机间有效的通信与调度系统,因此这些因素直接决定了车站的对外交通运输功能.在运营维护功能方面,客运汽车站通常设有系统化控制室,用于集中管理站内的电气与环境系统,以提升站点的安全性和运行效率.客运汽车站的旅客服务功能提供了包括安检、商用、候车、售票、问询、小件寄存托运、特殊需求服务等功能.

由于建筑中电力资源和水资源通常同建筑外部社区供应系统相连,且城市建筑群的震后功能损失评价已超出本文研究范围,因此假定逻辑树基本功能中的水源、电源不受地震影响.




(a)对外交通运输功能

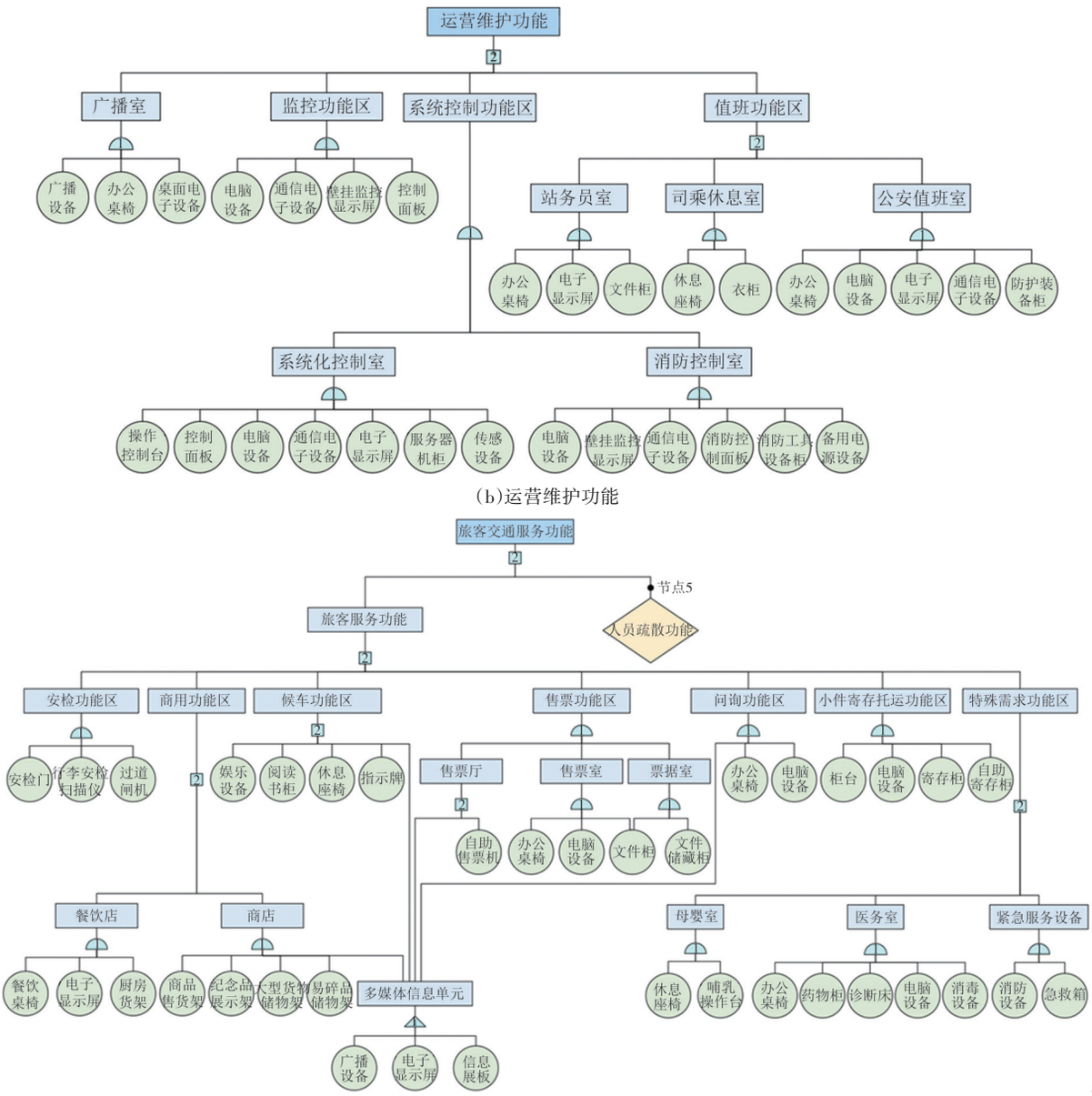



图 7　客运汽车站楼层高级功能组装方法

Fig.7　Assembly method of storey advanced function for passenger bus stations

需要指出的是,该方法仅提供功能组装的基本框架,具体的关联函数和关联方式并不唯一.由于逻辑树结构不完全遵循严格的分层架构,具有功能重合和跨级设计的特性,使得单个子功能或构件可能同时归属于多个上级子功能.因此,该方法可以针对不同类型的交通枢纽建筑构建相对应的逻辑树组装模型,具有灵活性强、适用范围广的特点.

2.2.3　交通功能

在交通枢纽建筑的高级功能中,对外交通运输功能直接影响着交通枢纽对外运输的通行效率,而人员疏散功能则决定了交通枢纽内部的旅客流动通行效率.以上两种交通功能的损失量化具有特殊性,需进一步详细说明.

交通枢纽建筑对车辆和航班的精细化管理依赖于关键功能区,如通信指挥室、信号控制室和车站控制室等.基于逻辑树模型,将关键功能区的功能损失组装为对外交通运输功能的损失值.值得注意的是,对外交通运输功能是交通枢纽建筑的整体功能,因此在进行构件功能组装时,应将所有楼层构件统一组装计算,得到建筑整体对外交通运输功能损失值,并将其作为各楼层的对外交通运输功能损失值.

在地震作用下,交通枢纽建筑内部构件的破坏会阻碍人员交通路线,降低内部人员的通行能力,进

而影响人员疏散功能.为量化人员疏散功能损失,采用人员平均疏散时间作为量化指标,计算方法如式(8)~式(10)所示.

$$L_{\text{foot}} = 1 - \frac{T_0}{T} \tag{8}$$

$$T_0 = \frac{\sum_u^s t_{u,0}}{s} \tag{9}$$

$$T = \frac{\sum_u^s t_u}{s} \tag{10}$$

式中:$L_{\text{foot}}$为交通枢纽建筑震后人员疏散功能损失值;$T_0$为震前人员平均疏散时间;$T$为震后人员平均疏散时间;$s$为疏散人员数量;$t_{u,0}$为人员$u$震前疏散时间;$t_u$为人员$u$震后疏散时间.

人员疏散时间可通过疏散仿真模拟得到.本研究基于多智能体模型,采用Pathfinder软件进行人员疏散模拟.由于人员疏散最大速度会受到人员身体健康状况、人员心理状态、构件损伤状况等的影响,因此采用Poulos等[44]提出的疏散速度折减模型,如式(11)所示.

$$v_{\max} = v_{u,\text{walk}} \cdot f_u^{\text{r}} \cdot f_u^{\text{h}} \cdot f_{u,m}^{\text{d}} \tag{11}$$

式中:$v_{u,\text{walk}}$为人员$u$步行正常速度;$f_u^{\text{r}}$为恐慌心理对疏散速度影响系数(默认$f_u^{\text{r}}$=1.2);$f_u^{\text{h}}$为健康状况对疏散速度的影响系数;$f_{u,m}^{\text{d}}$为区域$m$内构件损伤对疏散速度的折减系数.

$$f_u^{\text{h}} = \left(0.25 + 0.75h_u\right) \tag{12}$$

式中:$h_u$为人员$u$健康程度,受伤人员的健康程度$h_u$取0.5.

$$f_{u,m}^{\text{d}} = \prod_{l=1}^{n} f_{u,m,l}^{\text{d}} \tag{13}$$

式中:$f_{u,m,l}^{\text{d}}$为区域$m$内第$l$种构件损伤对人员疏散速度的折减系数.

由于人员疏散仿真模拟已经考虑到了楼层间相互关联的影响,因此各层的人员疏散功能损失均取为$L_{\text{foot}}$.

### 2.3 建筑总功能损失量化

相邻楼层的功能并非独立存在,而是通过楼梯、电梯、管道、电路等构件相互连接,共同构成建筑总功能,因此各个楼层功能存在明显的相关性.基于逻辑树功能组装模型,使用Zadeh算子计算关联楼层间的交通、管网、电力子功能,即图6中的节点1~节点3.由于关联构件通常由下至上传递功能,因此本楼层的节点功能损失取该节点与相邻下一楼层对应节点以及该楼层下所有层对应节点功能损失加权平均值的三者关联函数值,如式(14)所示.

$$F_{p,z} = \max\left(W_p \cdot F_{p,z,\text{initial}},\ W_{p-1} \cdot F_{p-1,z},\ \frac{\sum_{n=1}^{p-1}\left(W_n \cdot F_{n,z}\right)}{\sum_{n=1}^{p-1} W_n}\right) \tag{14}$$

式中:$F_{p,z,\text{initial}}$为建筑第$p$层中$z$类节点根据逻辑树计算的初始功能损失值;$F_{p-1,z}$为建筑第$p$-1层中$z$类节点的功能损失值;$F_{p,z}$为建筑第$p$层中$z$类节点根据关联函数计算得到的功能损失值;$W_p$为建筑第$p$层的权重系数.

不同功能系统的功能损失对楼层基本功能所造成的影响不同,而不同楼层的功能损失对总建筑功能损失的贡献程度也存在差异,因此采用权重系数来表示各功能系统和各楼层的重要性程度.采用TrueSkill算法分析问卷调查数据,并基于算法的处理逻辑设计问卷.TrueSkill算法简化了问卷设计,仅要求参与者做二选一的选择,例如"楼层基本功能中照明功能和暖通功能哪个更重要".这种方法避免了被调查者进行重要性判断的环节,有助于提升数据的可靠性和准确性.所有比较结束即可得出对应的重要性权重系数.

建筑总功能损失取各楼层功能损失的加权平均值,如式(15)所示.

$$F_{\text{total}} = \frac{\sum_{p=1}^{n} W_p \cdot F_p}{\sum_{p=1}^{n} W_p} \tag{15}$$

式中:$F_p$为建筑第$p$层的功能损失值;$n$为楼层数;$F_{\text{total}}$为建筑总功能损失.

为综合考虑不确定性因素对功能损失评价的影响,采用蒙特卡罗法生成多组工程需求参数的随机样本,模拟建筑功能损失的概率分布.针对交通枢纽建筑的震后功能损失评价流程如图8所示,具体步骤如下:

1)获取结构设计参数.根据实地调查、查阅建筑设计图纸等方式,分别建立建筑结构的数值计算模型和建筑构件信息数据集.

2)计算结构地震响应.根据建筑所处的位置和抗震设计规范,将地震激励输入到结构的数值计算模型中,得到结构地震响应.

3)扩充工程需求参数.从结构地震响应中提取构件的工程需求参数,并将其扩充至$N$组.

4)量化构件损伤状态和功能损失.通过易损性分析得到构件的损伤状态,并根据式(1)~式(6)计算构件的功能损失.通过人员疏散模拟,并根据式(8)~

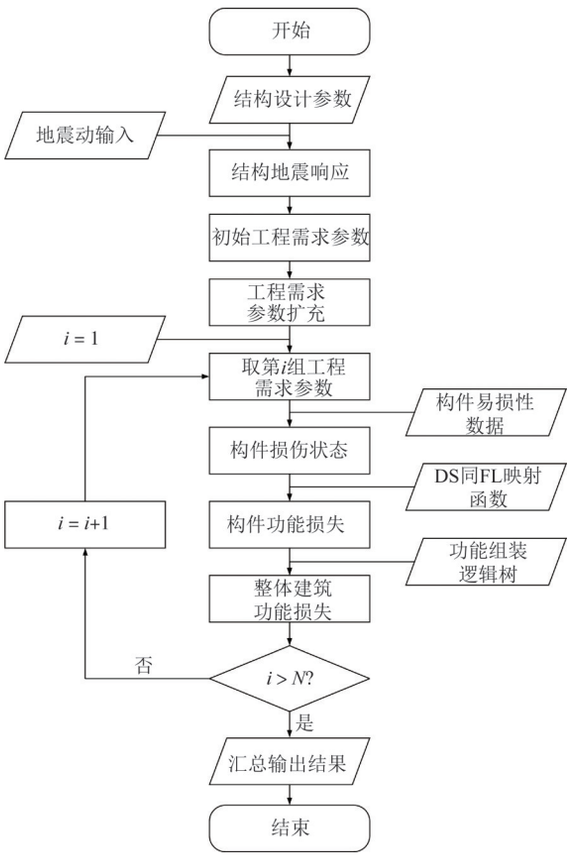



图 8　交通枢纽建筑震后功能损失评价流程图

Fig.8　Post-earthquake functional loss evaluation process of transportation hub buildings

式(13)计算人员疏散功能损失.

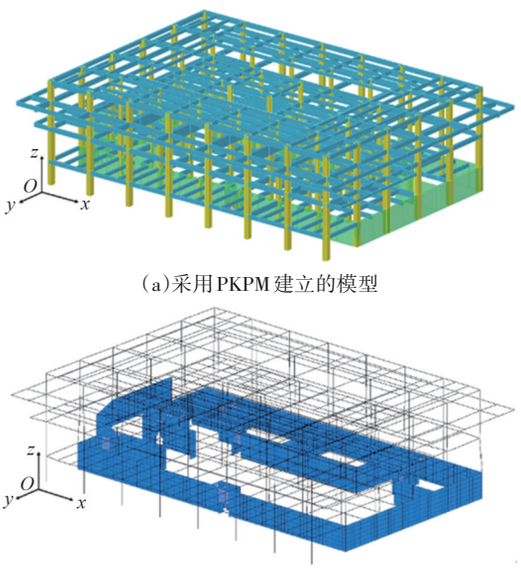
5)量化建筑总功能损失.分析建筑的各项功能逻辑关系,建立功能逻辑树系统,计算各楼层的功能损失.并根据式(14)和式(15)得到建筑总功能损失.

6)对每组工程需求参数重复步骤4)和步骤5),直到完成$N$组分析.

## 3　算例分析

### 3.1　建筑信息和地震响应

为验证提出的典型交通枢纽建筑震后功能损失评价方法的合理性和可行性,采用一个客运汽车站进行震后功能损失分析,算例建筑的PKPM模型和SAUSG模型如图9所示.该建筑为钢筋混凝土框架结构体系,按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)[45]和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[46]设计,抗震设防烈度为7度(0.1$g$),场地类别为Ⅱ类,设计地震分组为第一组,混凝土强度等级为C40,纵筋和箍筋牌号为HRB400,地上共3层(3层为建筑局部突出层,含不上人屋面),取地下室顶板作为上部结构计算的嵌固端,因此不考虑地下室结构响应和功能损失计算.




(a)采用PKPM建立的模型

(b)采用SAUSG建立的模型

图 9　结构数值分析模型

Fig.9　Numerical analysis model of structure

考虑双向地震作用,依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)[45]从美国太平洋地震工程研究中心(PEER)的NGA-West2地震动数据库中挑选出24条地震波.所选地震波均为自然波,矩震级范围为6.5~7.4,地下30 m水平剪切波速范围为200~800 m/s,地震波持续时间为10~80 s.将地震波按7度罕遇地震动强度(0.220$g$)进行调幅,主方向与次方向的峰值加速度比为1∶0.85,不考虑竖向地震作用.处理后的主方向地震波反应谱、平均反应谱以及规范反应谱对比如图10所示.采用SAUSG进行结构弹塑性时程分析,得到结构地震响应如图11所示.

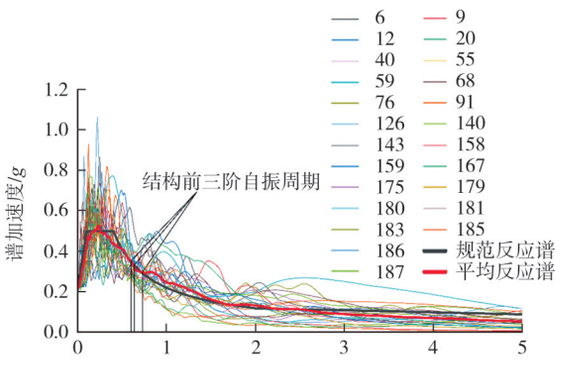
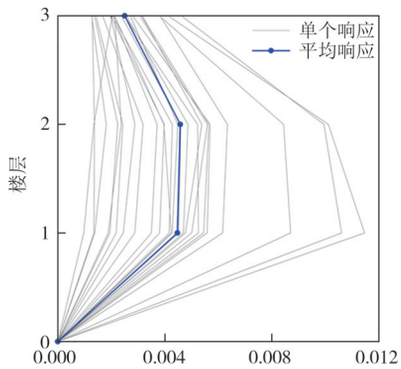
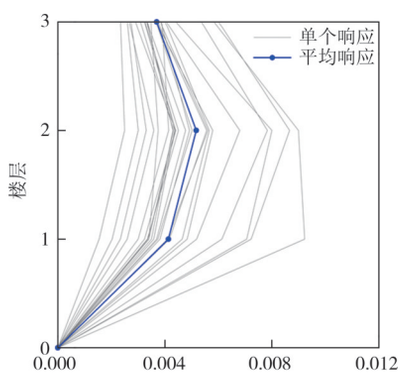



图 10　地震波加速度反应谱

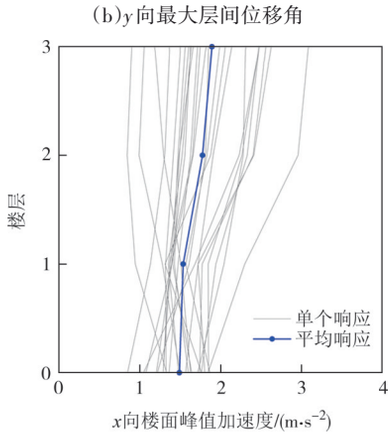
Fig.10　Acceleration spectra of seismic waves



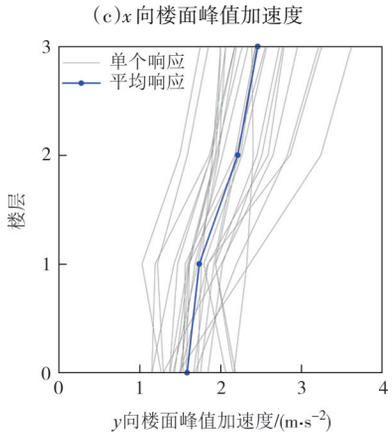

(a)$x$向最大层间位移角




(b)$y$向最大层间位移角




(c)$x$向楼面峰值加速度




(d)$y$向楼面峰值加速度

图 11 罕遇地震作用下的结构响应

Fig.11 Structural responses under the rare earthquake

### 3.2 构件功能损失

客运汽车站算例建筑共有3层,地面一层包含候车大厅、售票厅、服务台、站务办公等功能区;二层包含司乘值班室、办公室、餐厅、厨房、商业铺等功能区;三层为建筑结构局部突出层,主要包含水箱间、设备间等功能区.算例建筑共包含80个易损性组,构件功能组装方法如图4~图7所示,采用FEMA P-58[47]的构件易损性数据进行计算.将结构响应按照对数正态分布扩充至1 000组,得到结构构件各损伤状态占比如表4所示.在罕遇地震作用下,框架柱与框架梁的损伤均以轻微损伤为主,中度以上损伤比例较低,表明主体结构未发生大规模严重破坏,满足“大震不倒”的设防目标.

表4 结构构件各损伤状态占比

Tab.4 Damage state distribution of structural component

%

| 损伤状态 | 完好 | 轻微 | 轻度 | 中度 | 重度 |
|---|---|---|---|---|---|
| 框架柱 | 17.43 | 52.65 | 16.52 | 12.94 | 0.46 |
| 框架梁 | 17.97 | 61.10 | 15.41 | 5.43 | 0.09 |

将扩充后的工程需求参数输入到建筑的逻辑树系统中,每组结构响应生成一组构件功能损失值,功能损失计算结果如图12所示.计算结果表明,多数构件功能损失较小,仅少数非结构构件功能损失较为严重.对比同种构件在不同楼层下的功能损失值,可以发现构件功能损失的变化趋势与工程需求参数的变化趋势一致.位移敏感型构件中,填充墙(构件编号4)和隔墙(构件编号5)的功能损失较为显著,分别在地面2层达到最大值0.523和0.596.加速度敏感型构件中,桌面电子设备、通信电子设备、电脑设备、电子显示屏、壁挂监控显示屏、商品售货架、纪念品展示架(构件编号38、39、40、41、42、46、47)功能损失较为严重,分别在地面2层或顶层达到最大值0.417、0.415、0.417、0.481、0.486、0.420、0.699.部分构件,如灯具、空调系统风机、冷却水管、控制面板、电机控制箱、变压器(构件编号12、21、24、27、32、33)功能损失值较小,在顶层达最大值0.020、0.046、0.044、0.007、0.017、0.010.其他构件,如污水管、冷水管、水箱、暖通风管、低压开关、配电板(构件编号13、16、18、22、30、31),由于其损伤限值远大于楼层地震响应,因此对应的功能损失接近0.需要指出的是,由于部分构件仅存在于特定楼层,因此只在对应的楼层有功能损失数据.

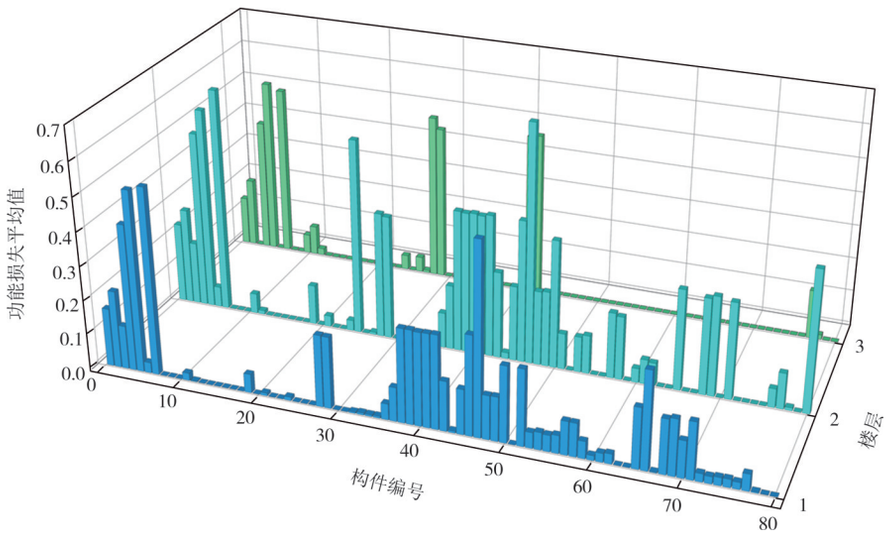



图 12　建筑各楼层的构件功能损失平均值

Fig.12　Average functional loss of components on each floor of the building

### 3.3　楼层功能损失

考虑到计算成本,选用初始的24组工程需求参数进行疏散仿真模拟. 鉴于扩充后的1 000组工程需求参数组成的参数矩阵与初始值具有相同的联合分布特性,因此基于24组工程需求参数及其对应的构件功能损伤状态得到的仿真结果能够近似代表1 000组参数下的模拟结果,并采用24组结果的平均值作为人员疏散功能损失的代表值. 疏散仿真模拟共进行25组,其中正常工况下1组,地震工况下24组,计算得到人员疏散功能损失值为0.630. 疏散仿真模拟结果表明地震作用下人员疏散功能损失较为显著.

为确定基本功能的功能系统重要性系数,通过网络平台和电子邮件共收集130份有效问卷,调查对象包括客运汽车站的使用者、管理人员和设计人员. 根据TrueSkill算法进行功能系统重要性分析,得到基本功能中空间、给排水、照明和暖通功能系统的重要性系数分别为0.271、0.254、0.239、0.236.

将构件功能损失及人员疏散功能损失分别输入功能损失逻辑树模型,得到各楼层的功能系统平均损失值,如图13所示,由于地面三层为建筑局部突出层(含不上人屋面),因此未考虑其高级功能. 楼层安全功能损失变化趋势与最大层间位移角相一致,整体呈先增后减趋势. 由于结构安全和抛落物安全的各构件分别为串联和独立的关系,因此结构安全功能损失整体高于抛落物安全功能损失,并在地面二层有最大值为0.445,在楼层安全功能损失中起主

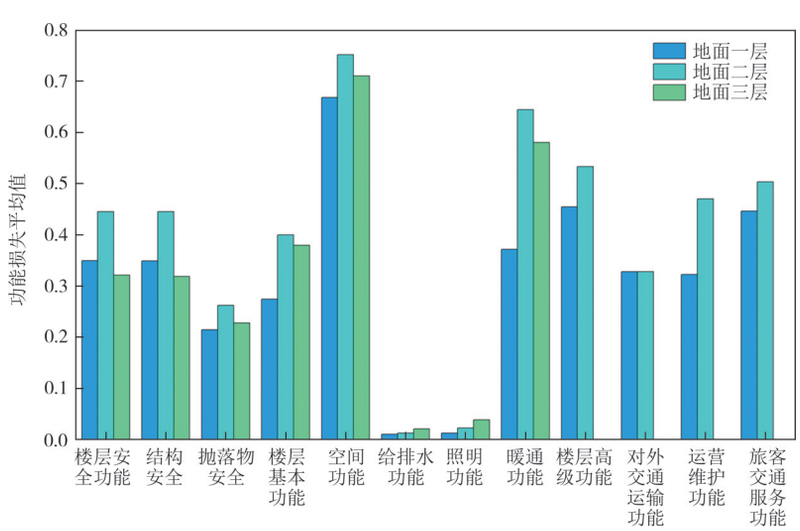


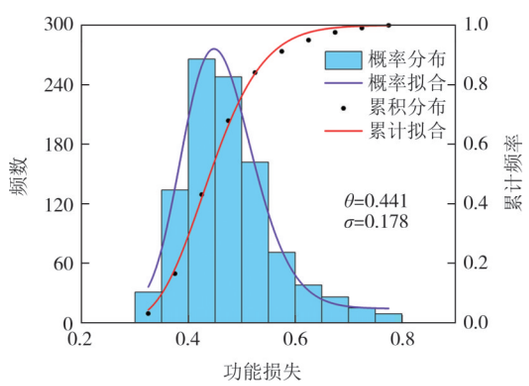

图 13　建筑各楼层功能系统的功能损失平均值

Fig.13　Average functional loss of the functional systems on each floor of the building

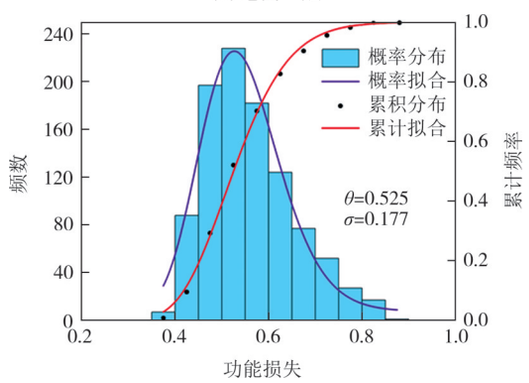
导作用. 楼层基本功能中,由于填充墙和隔墙的功能损失较大,空间功能损失也较为显著,在地面二层有最大值为0.752,而照明功能和给排水功能由于相关构件受地震作用影响较小,其功能损失较小. 由于高级功能的子功能为串联关系,因此高级功能主要受旅客交通服务功能影响. 地面一层和二层的总功能损失主要由高级功能损失主导,而地面三层则以基本功能为主导.

### 3.4 建筑总功能损失

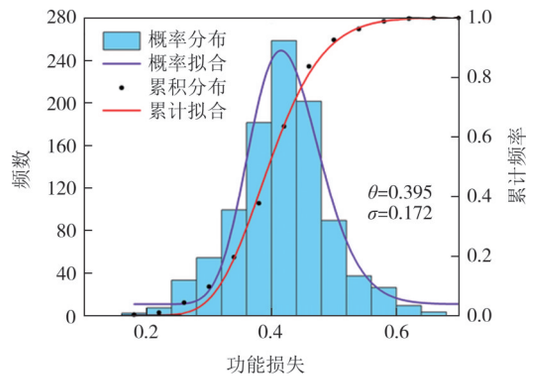
针对楼层重要性调查共回收131份网络问卷,问卷发放对象和发放渠道与功能区块重要性调查相同,经TrueSkill算法分析可得建筑一层至三层的重要性系数分别为0.374、0.333、0.293. 对各楼层及建筑整体1 000组功能损失结果数据进行分布和累积拟合,得到功能损失累积概率分布及拟合图,如图14所示. 地面一层至三层的功能损失中值和对数标准差($\theta$, $\sigma$)分别为(0.441, 0.178)、(0.525, 0.177)和(0.395, 0.172),建筑总功能损失中值为0.477,对数标准差为0.120. 由于地面三层仅考虑了楼层的基本功能和安全功能,且高级功能对楼层总功能损失影响较大,因此地面三层的功能损失整体低于其他楼层. 与地面一层相比,地面二层有着较大的层间位移角和楼面峰值加速度,因此其功能损失较为显著.



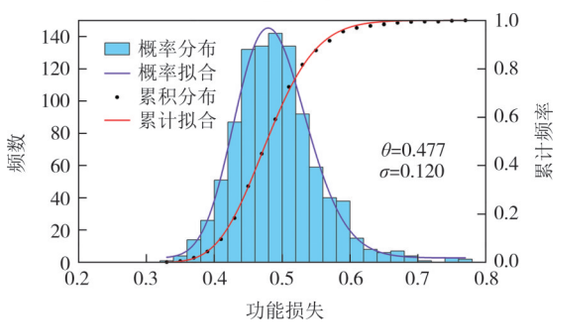
(a)地面一层



(b)地面二层



(c)地面三层



(d)建筑整体

图14 各楼层及建筑整体功能损失统计及拟合

Fig.14 Statistical analysis and fitting of function loss for each floor and the overall structure

## 4 结 论

本文提出了一种基于构件功能组装的典型交通枢纽建筑震后功能损失评价方法,通过算例验证了方法的可行性. 该方法为交通枢纽建筑的震后功能损失量化提供了手段. 利用该方法可以发现造成建筑震后功能损失的薄弱环节,量化对比不同的改进方案,调整优化建筑内部各类构件的配置,从而减轻建筑整体的震后功能损失,增强建筑震后功能的鲁棒性. 本文提出的交通枢纽建筑震后功能损失评价方法也为交通枢纽建筑的抗震韧性评价提供了基础. 获得的主要结论如下:

1)通过分析已有的构件损伤状态与功能损失关系,建立了符合对数正态概率分布的构件功能损失量化方法,结果表明指数函数能较好地拟合结构构件损伤状态与功能损失的映射关系,而非结构构件宜采用线性函数进行拟合.

2)以楼层为单位,将交通枢纽建筑划分为安全功能、基本功能和高级功能,引入模糊算子建立了构件功能组装逻辑树模型,提出了考虑楼层关联关系与人员疏散功能损失的交通枢纽建筑震后功能损失

评价方法.

3)算例结果表明,当楼层含有高级功能时,楼层的功能损失以高级功能损失为主,而高级功能主要受旅客交通服务功能的影响.交通枢纽建筑的人员疏散功能易受到地震作用的影响,需引起足够重视.

本文提出的震后功能损失评价方法具有较强的普适性,可针对不同类型的交通枢纽建筑进行功能组装和拓展,但在人员疏散功能领域还需进一步细化功能损失分析.由于交通枢纽建筑的运转依赖于外部资源的供应,后续研究可扩展至外部资源影响下的功能损失分析.

## 参考文献


[1] 翟长海,刘文,谢礼立. 城市抗震韧性评估研究进展[J]. 建筑结构学报,2018,39(9):1-9.
ZHAI C H, LIU W, XIE L L. Progress of research on city seismic resilience evaluation [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(9): 1-9. (in Chinese)

[2] 阪神・淡路大震災鉄道復興記録編纂委員会. よみがえる鉄路:阪神・淡路大震災鉄道復興の記録[M]. 日本: 運輸省鉄道局, 1996.
Hanshin-Awaji Earthquake Railway Reconstruction Memoir Compilation Committee. Hanshin-Awaji earthquake railway reconstruction record [M]. Japan: Department of Railways, Ministry of Transport, 1996. (in Japanese)

[3] MIRANDA E, MOSQUEDA G, RETAMALES R, et al. Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile earthquake [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28 (Sup.1): 453-471.

[4] 黄勇, 谢亚晨, 田亮, 等. 2023年土耳其7.8级地震交通系统震害与启示[J]. 世界地震工程, 2023, 39(3): 1-15.
HUANG Y, XIE Y C, TIAN L, et al. Earthquake damage and enlightenment from traffic system in 2023 Turkey $M_s$7.8 earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2023, 39(3): 1-15. (in Chinese)

[5] 丛阳. 城市综合体多层级功能损失及抗震韧性评估方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
CONG Y. Study on multi-level function loss and seismic resilience assessment method of urban complex [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)

[6] 宁晓晴. 重要建筑地震安全性及韧性评价方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018.
NING X Q. Research on evaluation methodology of seismic safety and resilience for significant buildings [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2018. (in Chinese)

[7] 薛璐. 交通阻滞影响下区域建筑震后功能恢复能力评估[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
XUE L. Evaluation of functional recovery ability of regional buildings after earthquake under the influence of traffic block[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)

[8] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience [J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3639-3649.

[9] 滕睿,尚庆学,钟湘,等. 基于试验数据的砌体填充墙易损性研究[J]. 世界地震工程,2018,34(2):96-103.
TENG R, SHANG Q X, ZHONG X, et al. Fragility studies for masonry infill walls based on experimental data [J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(2): 96-103. (in Chinese)

[10] 芦燕,张一鸣,张晓龙. 单层网壳吊顶系统抗震韧性研究[J]. 地震工程与工程振动,2021,41(6):105-113.
LU Y, ZHANG Y M, ZHANG X L. An investigation on seismic resilience of ceiling system attached to single-layer reticulated dome [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(6): 105-113. (in Chinese)

[11] 刘瑞康. 基于构件变形和耗能的框剪结构地震损伤评估[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2019.
LIU R K. Deformation and energy-based seismic damage assessment of frame-shear wall structure[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese)

[12] 樊禹江, 余滨杉, 鲁元龙, 等. 修正的Park-Ang性能增强再生混凝土框架中节点地震损伤模型[J]. 实验力学,2020,35(1):159-166.
FAN Y J, YU B S, LU Y L, et al. Study on Modified Park-Ang seismic damage model for interior joints of enhanced recycled aggregate concrete frame[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020,35(1):159-166. (in Chinese)

[13] 陈聪,吕西林, 陈云. 带有耗能连梁的钢筋混凝土剪力墙结构地震损伤评估[J]. 防灾减灾工程学报, 2019,39(1):45-53.
CHEN C, LYU X L, CHEN Y. Seismic damage assessment of reinforced concrete shear wall structure with coupling beam dampers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2019,39(1): 45-53. (in Chinese)

[14] 卢啸. 钢筋混凝土框架核心筒结构地震韧性评价[J]. 建筑结构学报,2021,42(5):55-63.
LU X. Seismic resilience evaluation of reinforced concrete frame core tube structure [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(5): 55-63. (in Chinese)

[15] JIANG H J, BU H F, HE L S. A new method for function-loss based seismic resilience assessment of buildings[J]. Engineering Structures,2022, 266:114613.

[16] 贺思维. 灾害作用下单体建筑的功能损失评估方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所,2017.
HE S W. Computational evaluation of the functional loss of individual buildings under disasters [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017.

(in Chinese)

[17] YU P, WEN W P, JI D F, et al. A framework to assess the seismic resilience of urban hospitals[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 7654683.

[18] WEN W P, HU J, ZHAI C H, et al. Post-earthquake functionality assessment of subway stations considering the interdependency among sub-systems[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2024, 39(1): 136-161.

[19] LIU J, ZHAI C H, YU P. A probabilistic framework to evaluate seismic resilience of hospital buildings using Bayesian networks [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 226: 108644.

[20] 李文俊. 我国典型房屋建筑地震易损性模型研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021.
LI W J. Research on the seismic vulnerability models of typical buildings in China [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2021. (in Chinese)

[21] 地震现场工作 第4部分: 灾害直接损失评估: GB/T 18208.4—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Post-earthquake field works—part 4: assessment of direct loss: GB/T 18208.4—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese)

[22] MELANI A, KHARE R K, DHAKAL R P, et al. Seismic risk assessment of low rise RC frame structure[J]. Structures, 2016, 5: 13-22.

[23] HAZUS. Earthquake loss estimation methodology [S]. Washington, D. C.: National Institute of Building Science, 2003.

[24] 欧进萍, 何政, 吴斌, 等. 钢筋混凝土结构基于地震损伤性能的设计[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(1): 21-30.
OU J P, HE Z, WU B, et al. Seismic damage performance- based design of reinforced concrete structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(1): 21-30. (in Chinese)

[25] 郑世杰. 单层柱面铝合金网壳结构地震易损性及概率风险评估[D]. 广州: 广州大学, 2020.
ZHENG S J. Seismic vulnerability and probability risk assessment of single-layer cylindrical aluminum alloy reticulated shell structure [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020. (in Chinese)

[26] 王娜. 大跨度拱形空间桁架结构的地震易损性分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
WANG N. Seismic fragility analysis of large-span arch truss structure [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019. (in Chinese)

[27] 王鼎, 刘航, 王娜, 等. 大跨度拱形空间桁架干煤棚的地震易损性分析[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(5): 5-11.
WANG D, LIU H, WANG N, et al. Seismic fragility analysis of large-span arch truss of dry coal shed [J]. Sichuan Building Science, 2019, 45(5): 5-11. (in Chinese)

[28] 支旭东, 龚俊, 范峰. 正放四角锥平板网架楼盖地震易损性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 32-38.
ZHI X D, GONG J, FAN F. Research on the seismic fragility of orthogonal pyramid space grid[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 32-38. (in Chinese)

[29] 张天明. 空间网格结构的地震损伤快速评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
ZHANG T M. Research on rapid assessment of seismic damage for spatial latticed structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)

[30] 朱益峰. 考虑地震方向性的大跨度钢结构网架地震响应分析及易损性分析[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2021.
ZHU Y F. Earthquake response analysis and fragility analysis of long-span steel structure truss considering seismic input direction [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[31] 刘焕芹. 张弦梁结构的地震易损性分析研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
LIU H Q. Seismic fragility analysis of beam string structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)

[32] 徐强, 马艳, 王社良. 基于构件损伤的防屈曲支撑钢框架易损性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(4): 61-68.
XU Q, MA Y, WANG S L. Vulnerability analysis of buckling-restrained brace frame based on the component damage [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(4): 61-68. (in Chinese)

[33] 刘伯权, 白绍良, 刘鸣. 抗震结构的等效延性破坏准则及其子结构试验验证[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(3): 77-83.
LIU B Q, BAI S L, LIU M. Equivalent ductility damage criteria of earthquake-resistant structures and their verification by substructure method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1997, 17(3): 77-83. (in Chinese)

[34] 牛荻涛, 任利杰. 改进的钢筋混凝土结构双参数地震破坏模型[J]. 地震工程与工程振动, 1996, 16(4): 44-54.
NIU D T, REN L J. A modified seismic damage model with double variables for reinforced concrete structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1996, 16(4): 44-54. (in Chinese)

[35] 薄景山, 张建毅, 孙平善, 等. 震害指数及有关问题的讨论[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(6): 37-42.
BO J S, ZHANG J Y, SUN P S, et al. Discussion on seismic damage index and relevant problems [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(6): 37-42. (in Chinese)

[36] 陈宗平, 徐金俊, 薛建阳, 等. 基于变形和能量双重准则的型钢混凝土异形柱地震损伤行为研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(8): 29-37.
CHEN Z P, XU J J, XUE J Y, et al. Deformation and energy-based seismic damage behavior of SRC specially shaped columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(8): 29-37. (in Chinese)

[37] 林旭川, 刘雪艳, 胡仁康, 等. 鲁甸地震宏观震中建筑群震害分析与抗震韧性评估[J]. 地震研究 ,2020, 43(3): 449-455.
LIN X C, LIU X Y, HU R K, et al. Regional damage analysis and resilience evaluation of buildings in the epicenter region of 2014 Ludian earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(3): 449-455. (in Chinese)

[38] 徐娅婷, 方育铭. 城市区域建筑居住功能的抗震韧性量化分析[J]. 城市建筑, 2021,18(16):157-162.
XU Y T, FANG Y M. Quantitative analysis of seismic resilience of residential functions in urban areas [J]. Urbanism and Architecture, 2021, 18(16):157-162. (in Chinese)

[39] 毕可为. 群体建筑的易损性分析和地震损失快速评估[D]. 大连:大连理工大学,2009.
BI K W. Vulnerability analysis of group buildings and earthquake loss fast estimation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)

[40] 孙龙飞. 城市地震灾害损失评估方法及系统开发研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
SUN L F. Research on the earthquake disaster loss assessment method for urban areas and system development[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. (in Chinese)

[41] 陈洪富. 城市房屋建筑装修震害损失评估方法研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2008.
CHEN H F. Study on earthquake damage loss assessment of urban buildings' decorations [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese)

[42] 李钢, 薛璐, 余丁浩, 等. 考虑交通阻滞的区域建筑震后功能恢复能力评估[J]. 土木工程学报,2021,54(12):1-11.
LI G, XUE L, YU D H, et al. Evaluation of functional recovery ability of regional buildings after earthquake considering traffic block[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(12):1-11. (in Chinese)

[43] 王晓娜. 不同材质供水管道地震易损性研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2022.
WANG X N. Study on seismic vulnerability of water supply pipelines with different materials [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese)

[44] POULOS A, DE LA LLERA J C, MITRANI-REISER J. Earthquake risk assessment of buildings accounting for human evacuation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017,46(4):561-583.

[45] 建筑抗震设计规范(2016年版):GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
Code for seismic design of buildings (2016 version): GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)

[46] 混凝土结构设计规范(2015年版): GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Code for design of concrete structures (2015 version): GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

[47] Seismic performance assessment of buildings volume 1-methodology: FEMA P-58 [S]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2012.