

DOI: 10.11779/CJGE202212006

# 考虑损伤界限模糊性的地铁车站结构抗震性能评价

钟紫蓝, 史跃波, 李锦强, 赵 密\*, 杜修力

(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)

**摘 要:** 在基于性能的地震工程理论框架下, 地下结构易损性分析及抗震性能评价当中结构损伤状态的划分多采用确定性的损伤状态阈值。基于传统地下结构易损性分析框架基础上进一步提出了考虑损伤界限模糊性的地下结构易损性分析方法, 以三层三跨地铁车站结构为例建立二维非线性土-结构相互作用分析模型, 选取 21 条地表天然地震动反演到基岩面并调幅作为非线性增量动力分析的输入地震动, 引入三角形和拟正态形隶属度函数计算不同损伤状态下最大层间位移角的隶属度得到不同地震动强度等级下的模糊失效概率, 通过极大似然估计方法拟合计算结果并建立考虑损伤界限模糊性的地铁车站结构易损性曲线。分析结果表明: 采用模糊性评价方法所给出的地下结构地震易损性曲线总体上更趋于安全; 考虑损伤界限的模糊性, 会增加结构地震易损性曲线的离散性; 而且隶属度函数类型的选取对模糊地震易损性分析结果影响可忽略不计。

**关键词:** 地铁车站结构; 易损性分析; 损伤界限模糊性; 极大似然估计

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)12-2196-10

**作者简介:** 钟紫蓝(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn。

## Seismic performance assessment of subway station structures considering fuzzy probability of damage states

ZHONG Zi-lan, SHI Yue-bo, LI Jin-qiang, ZHAO Mi, DU Xiu-li

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

**Abstract:** Quantification of structural damage states in the fragility analysis and seismic performance evaluation of underground structures usually adopts the deterministic threshold values, which is a limitation in the framework of performance-based seismic engineering. A new seismic fragility analysis method considering the fuzzy probability of damage states of the underground structures is proposed based on the fragility analysis framework of the traditional underground structures. A two-dimensional nonlinear finite element model for a three-story and three-span subway station structure is established fully considering the soil-structure interaction (SSI). The input ground motions used in the nonlinear incremental dynamic analysis of the SSI model are back-calculated from an ensemble of 21 actual earthquake records on the ground surfaces. The triangle and quasi-normal membership functions are introduced to compute the membership degrees of the maximum interlayer drift ratios for different damage states so as to derive the fuzzy failure probability under different intensity levels of ground motions. The maximum likelihood estimation method is used to fit the numerical results and establish the seismic fragility curves of subway station structures considering the fuzzy probability of damage states. The results of the numerical study indicate that the seismic fragility curves of the underground structures derived from the proposed method generally give a safer estimation of the seismic performance of the structures. The dispersions of the seismic fragility curves increase with the consideration of the fuzzy probability of damage states. Besides, the influences of the membership function types on the results of the fuzzy seismic fragility analysis can be ignored.

**Key words:** subway station structure; fragility analysis; fuzzy probability of damage states; maximum likelihood estimation

## 0 引 言

自 1995 年阪神地震以来, 地下结构抗震问题引起了全世界的重视<sup>[1]</sup>。为合理评估地下结构的抗震性能, 基于性能的地震工程理论框架中结构地震易损性分析方法被众多国内外学者应用于地下结构抗震性能

评价当中<sup>[2]</sup>。在地上结构易损性分析框架基础上, 地下结构地震易损性研究也已形成完整的流程<sup>[3]</sup>, 其中

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (51978020); 国家自然科学基金联合基金项目 (U1839201); 广东省地震工程与应用技术重点实验室开放基金项目 (2017B030314068)

**收稿日期:** 2021-09-14

**\*通信作者** (zhaomi@bjut.edu.cn)

损伤指标的选取和结构损伤状态的量化是地震易损性分析当中的两个关键因素。

FEMA P58-1<sup>[4]</sup>指出层间位移角、楼层加速度和楼层速度是易损性分析中最典型的工程需求参数 (Engineering Demand Parameter, EDP) 和损伤评价指标。Williams 等<sup>[5]</sup>回顾了已有的钢筋混凝土结构损伤指标, 将其分为整体损伤指标和局部损伤指标两类, 并将局部地震损伤指标按照是否考虑往复荷载作用下的累积损伤归纳为非累积损伤指标、累积损伤指标和复合指标 3 类。现阶段国内外学者在对矩形地下结构的地震易损性研究当中, 损伤指标的选取相较于地上结构比较单一, 主要包括两类<sup>[6]</sup>: ①以强度屈服准则为代表的构件横截面实际弯矩与弯矩承载力之比 ( $M/M_R$ ), 如 Argyroudis 等<sup>[7]</sup>, Nguyen 等<sup>[8]</sup>国内外学者以构件弯矩比为损伤指标, 针对不同类型地下结构进行了抗震性能评价; ②以变形屈服准则为代表的结构最大层间位移角 (Maximum Interlayer Displacement Ratio, MIDR), 如 He 等<sup>[9]</sup>, Jiang 等<sup>[10]</sup>, Zhong 等<sup>[3]</sup>, 钟紫蓝等<sup>[11-13]</sup>, Liu 等<sup>[14]</sup>国内外学者分别以最大层间位移角为损伤指标, 针对不同类型场地中不同尺寸的地铁车站及矩形隧道结构建立了易损性曲线。其中前者以弯矩比作为评价指标仅适用于地下结构为线弹性的工况, 而在考虑结构非线性地震响应分析中, MIDR 是现阶段使用最为广泛的结构损伤评价指标。

在以上国内外学者对矩形横断面地下结构的易损性分析当中, 均采用确定性的方法对结构不同损伤状态的阈值进行量化定义。虽然, Du 等<sup>[15]</sup>, 杜修力等<sup>[16]</sup>通过对 18 座地铁车站进行考虑土结构相互作用的整体式推覆分析, 并基于所得的 Pushover 曲线簇采用作图法给出具有一定统计意义的地铁车站结构不同损伤状态界限值, 然而在实际地下车站结构地震易损性分析过程中不同损伤状态对应的阈值仍然采用的是确定性的平均值。实际上结构的损伤是在地震作用下的一个连续过程, 因此相邻的结构损伤状态之间的阈值本身具有较大不确定性, 采用明确的界限来区分不同的损伤状态具有一定的局限性。鉴于此, 近些年来模糊数学理论<sup>[17]</sup>及相关方法被初步应用于考虑不同结构损伤状态阈值的模糊性。国内外学者<sup>[18-23]</sup>采用模糊概率分析方法计算了不同地上工程结构的地震损伤概率及易损性, 结果表明考虑损伤界限模糊性的结构抗震性能评价方法更为严谨合理。

针对现阶段地下结构易损性研究中多采用确定性的损伤状态阈值的不足, 本文提出了一种可以考虑损伤界限模糊性的地下结构易损性分析方法, 以三层三跨地铁车站结构为研究对象, 采用增量动力分析法

(Increment Dynamic Analysis, IDA) 计算在结构地震作用下的最大层间位移响应, 利用模糊数学分析方法, 引入三角形隶属度函数和拟正态形隶属度函数对损伤状态进行模糊处理, 从而计算结构的失效概率, 通过极大似然估计法拟合易损性曲线双参数, 建立地铁车站结构的模糊地震易损性曲线, 分析损伤界限不确定性以及隶属度函数形式对易损性分析的影响程度。

## 1 考虑损伤界限模糊性的地下结构易损性分析方法

### 1.1 结构模糊损伤评估方法

模糊综合评价模型的建立主要包括确定因素集  $U$ , 确定评语集  $V$ , 选择隶属度函数  $\mu$ , 建立模糊综合评价矩阵  $B$  共 4 个步骤。

#### (1) 确定因素集 $U$

因素集由  $m$  个损伤评估因子组成即  $U=\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ , 本文的因素集为  $U=\{\text{最大层间位移角}\}$ 。

#### (2) 确定评语集 $V$

$V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 本算例的评语集为  $V=\{\text{基本完好, 轻微破坏, 中等破坏, 严重破坏, 倒塌}\}$ 。

#### (3) 隶属度函数选择

损伤指标隶属度函数的构建原则通常应满足 4 个条件: ①一个损伤指标应只可能属于两种损伤状态, 即  $\mu_{i-1}(DI) + \mu_i(DI) = 1$  或  $\mu_i(DI) + \mu_{i+1}(DI) = 1$ ; ②评语集  $V$  中的元素等于均值时其隶属度等于 1; ③在评语集  $V$  中相邻元素交界处的隶属度取为 0.5; ④首末评语集上限或下限隶属度函数适当调整取为 1。

常见的隶属度函数按照形状可以分为线性和非线性两类<sup>[24]</sup>, 其中线性隶属度函数主要包括梯形和三角形隶属度函数。三角形隶属度函数为

$$\mu(D) = \begin{cases} 0 & (D \leq D'_L) \\ \frac{D - D'_L}{D_m - D'_L} & (D'_L < D \leq D_m) \\ \frac{D'_U - D}{D'_U - D_m} & (D_m < D \leq D'_U) \\ 0 & (D'_U \leq D) \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $D$  为结构损伤指标,  $D'_L$ ,  $D'_U$  为与当前损伤状态相邻的两个损伤状态上下限的平均值,  $D_m$  为当前损伤状态上下限的平均值。

非线性隶属度函数可以分为岭形、多项式形、指数形等。线性隶属度函数和指数形隶属度函数中的拟正态形隶属度函数为

$$\mu(D) = e^{-k(D-D_m)^2}, \quad k = \begin{cases} 4 \ln 2 / (D'_L - D_m)^2 & (D \leq D_m) \\ 4 \ln 2 / (D'_U - D_m)^2 & (D > D_m) \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $k$  为拟正态形隶属度函数的形状参数。

现阶段线性隶属度函数和指数形隶属度函数中的拟正态形隶属度函数在工程中的应用比较广泛<sup>[18-24]</sup>。本文分别选用上述两种隶属度函数进行模糊易损性分析。

#### (4) 确定模糊综合评价矩阵 $B$

通过建立各评定因素  $u_i$  对各损伤等级  $v_i$  的隶属度, 即可组成  $u_i$  与模糊损伤论域  $V$  之间的模糊关系向量  $R_i = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}]$ , 其中  $r_{ij} = \mu_{vj}(u_i)$ ; 各因素  $u_i (i=1, 2, \dots, m)$  对  $V$  的模糊关系向量联合起来可构成模糊综合评价矩阵  $B$ :

$$B = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (3)$$

对于本文而言,  $B = [r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{15}]$ 。

### 1.2 模糊失效概率计算及易损性曲线拟合

参考 Gu 等<sup>[22]</sup>, Li 等<sup>[19]</sup>对模糊失效概率的定义, 本文将结构处于某一损伤状态区间的概率称为给定损伤等级出现概率, 将结构超越某一损伤界限的概率称为给定损伤等级超越概率。

在不考虑损伤界限模糊性的情况下, 结构在某一地震动强度等级下, 给定损伤等级的出现概率和超越概率为

$$P_{fi} = P(D_{Li} \leq D \leq D_{Ui}) = \frac{m_i}{M} \quad (4)$$

$$P_{ci} = P(D \geq D_{Ui}) = \sum_{i=N}^N P_{fi} \quad (5)$$

式中,  $m_i$  为使损伤指标处于第  $i$  个损伤区间的地震动条数,  $M$  为总地震记录条数,  $N$  为损伤状态区域数,  $D_{Li}$ ,  $D_{Ui}$  分别为第  $i$  个损伤区间的上下界。

根据模糊集理论考虑损伤状态阈值模糊性后, 结构在某一地震动强度等级下, 给定损伤等级的出现概率和超越概率为

$$\tilde{P}_{fi} = \sum_{k=1}^M B_{fi}^k p_k \quad (6)$$

$$\tilde{P}_{ci} = \sum_{i=1}^N \tilde{P}_{fi} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M B_{fi}^k p_k \quad (7)$$

式中,  $B_{fi}^k$  为模糊综合评价矩阵  $B$  中的元素, 代表第  $k$  条地震动作用下结构损伤处于第  $i$  个损伤状态的隶属度,  $p_k$  为每条地震动事件的出现概率, 假设各地震动事件相互独立, 出现概率相同, 则  $p_k = 1/M$ 。

在得到各地震动强度下结构的给定损伤等级超越概率后根据下式中的对数正态累计分布函数式拟合地震易损性曲线的  $S_m$  和  $\beta$  值:

$$F_f = \Phi \left[ \frac{\ln(IM/S_m)}{\beta} \right] \quad (8)$$

已知给定损伤等级超越概率对式 (8) 进行拟合需要获得最优的  $S_m$  值和最优的  $\beta$  值, 实现这一参数估计过程有许多种方法, 如 Baker 等<sup>[25]</sup>, Shinozuka 等<sup>[26]</sup>提出的极大似然法, 如式 (9) 所示为本文采用的极大似然参数估计公式。

$$\{\hat{S}_m, \hat{\beta}\} = \max \sum_{j=1}^m \left\{ p_j \ln \Phi \left( \frac{\ln IM_j - \ln \hat{S}_m}{\hat{\beta}} \right) + (1 - p_j) \ln \left[ 1 - \Phi \left( \frac{\ln IM_j - \ln \hat{S}_m}{\hat{\beta}} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

式中,  $p_j$  为某一地震动强度下, 式 (5) 或式 (7) 计算出的不同损伤状态下的模糊超越概率,  $\beta$ ,  $S_m$  为待估的易损性曲线双参数, 为了快速找出式 (9) 中双参数的最优解, 本文采用了差分进化算法<sup>[27]</sup>来求解。

### 1.3 模糊地震易损性分析流程

本文提出的考虑损伤界限模糊性的地下结构地震易损性分析方法如图 1 所示。



图 1 考虑损伤界限模糊性的地下结构地震易损性分析流程

Fig. 1 Seismic fragility analysis of underground structures considering fuzzy probability of damage states

本文与传统地下结构易损性分析流程的主要区别在于考虑了结构损伤界限的模糊性, 分析流程如下:

(1) 以三层三跨地铁车站结构为例, 建立土-结构有限元整体分析模型。

(2) 根据场地信息选择地震动记录并反演到基岩, 以峰值加速度 PGA 为地震动强度参数, 将反演得到的加速度时程由  $0.05g \sim 0.8g$  进行 7 次调幅, 作为非线性动力时程分析的地震动输入。

(3) 对结构损伤状态进行划分, 构建不同损伤状态下的隶属度函数。

(4) 将增量动力分析得到的结构响应带入不同损伤指标的隶属度函数中, 确定各结构响应对应损伤状态的隶属度, 建立模糊综合评价矩阵。

(5) 计算不同 IM 下的模糊失效概率, 基于极大似然法根据失效概率拟合易损性曲线双参数, 建立不

同损伤状态下的地震易损性曲线。

2 地震动选取及有限元模型建立

2.1 土 - 结构有限元模型建立

本文计算分析所用场地物理参数见表 1。

表 1 II 类场地土层物理参数

Table 1 Physical parameters of type II site soil

土层 序号	土类	土层厚 度/m	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	剪切波速 /(m·s <sup>-1</sup> )
1	人工填土	5.0	1750	180
2	粉质黏土	10.0	1900	250
3	细中砂	10.0	2000	300
4	细粉砂	15.0	2000	320
5	卵石	20.0	2280	500

选择北京通州某一地区的典型场地剖面作为分析案例, 基于波动理论将场地土层简化为均匀成层模型, 场地由上及下依次由人工填土、粉质黏土、细中砂、细粉砂和卵石构成, 根据规范<sup>[28]</sup>计算得到的等效剪切波速为 237 m/s, 属于 II 类场地, 场地基本周期为 0.6 s。

如图 2 所示为本文结构横断面尺寸配筋以及有限元整体分析模型, 地铁车站结构选用南京市某埋深 10 m 的三层三跨框架岛式结构, 混凝土材料选用 C30 混

凝土, 钢筋材料选用 HPB235 型号, 在 ABAQUS 中建立土 - 结构整体有限元分析模型进行非线性 IDA 分析, 结构主体通过纤维梁单元建立, 基于曲哲等<sup>[29]</sup>开发的单轴滞回本构模型集合 PQ-fiber 中的 USteel02 和 UConcrete02 材料本构模型来模拟钢筋混凝土的非线性力学行为; 土体通过平面应变单元建立, 基于等效线性化方法<sup>[30-31]</sup>考虑刚度退化和阻尼增加; 模型侧边界设置为捆绑边界<sup>[32]</sup>, 底部边界约束竖向位移, 将地震动作为平面剪切波在模型底部输入。本文具体建模流程、结构材料参数、土体的剪切模量曲线和阻尼曲线以及模型验证可以参考笔者以往相关研究<sup>[3, 11-13]</sup>。

2.2 地震动记录选取及调幅

国外学者 Vamvatsikos 等<sup>[33]</sup>的研究表明, 在 IDA 方法中采用 20 条地震动并将其幅值折半后作为工程基岩处地震输入, 足够反应出地震动记录带来的不确定性影响; FEMA P58-1 也指出在进行非线性动力时程分析过程中, 若所选用地震动的反应谱与目标反应谱拟合较好, 每个强度等级下可采用 7 条地震动, 当每个强度等级下采用 11 条及以上地震动时足以反应地震动的不确定性影响。综合以上分析并根据 FEMA

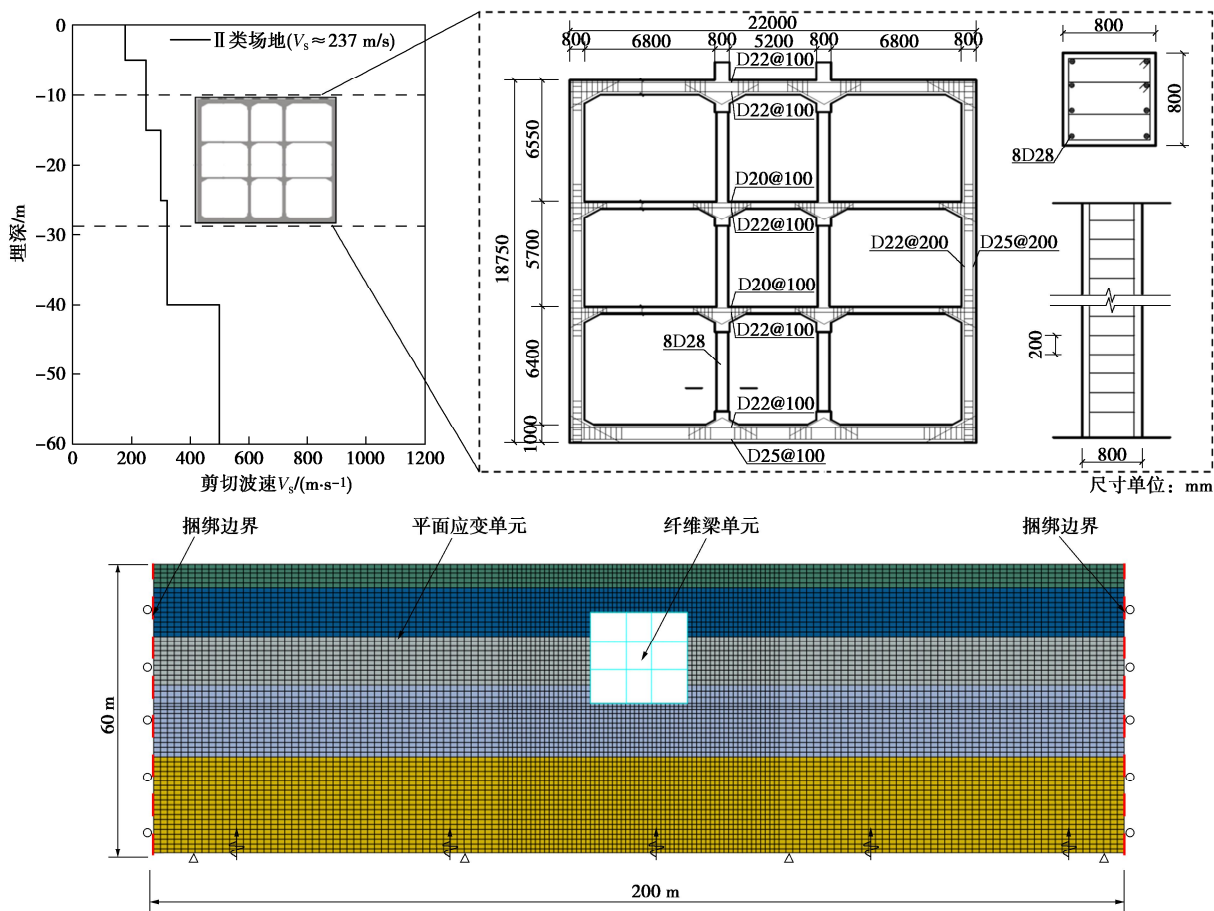


图 2 地铁车站结构横断面及有限元模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross-section of subway station structures

P695 的推荐, 本文选取了出自于美国太平洋地震研究中心 (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 简称 PEER) 强震记录数据库中的地表 21 条水平向强震记录, 如表 2 所示。

表 2 本文选用的地震动记录

Table 2 Ground motion records selected in this paper				
序号	地震	台站	震中距 /km	PGA/g
1	San Fernando	LA - Hollywood Stor FF	22.77	0.225
2	Friuli Italy-01	Tolmezzo	14.97	0.357
3	Imperial_Valley-06	Delta	22.03	0.236
4	Imperial_Valley-06	El Centro Array #11	12.56	0.367
5	Superstition Hills-02	El Centro Imp. Co. Cent	18.20	0.357
6	Superstition Hills-02	Poe Road (temp)	11.16	0.475
7	Loma Prieta	Capitola	8.65	0.511
8	Loma Prieta	Gilroy Array #3	12.23	0.559
9	Landers	Coolwater	19.74	0.284
10	Landers	Yermo Fire Station	23.62	0.245
11	Northridge-01	Beverly Hills - 14145 Mulhol	9.44	0.443
12	Northridge-01	Canyon Country - W Lost Cany	11.39	0.404
13	Kobe Japan	Nishi-Akashi	7.08	0.483
14	Kobe Japan	Shin-Osaka	19.14	0.225
15	Kocaeli Turkey	Arcelik	10.56	0.210
16	Kocaeli Turkey	Duzce	131.17	0.312
17	Chi-Chi Taiwan	CHY101	9.94	0.340
18	Chi-Chi Taiwan	TCU045	26.00	0.473
19	Duzce Turkey	Bolu	12.02	0.740
20	Manjil Iran	Abbar	12.55	0.515
21	Hector Mine	Hector	10.35	0.265

表 2 所示的地震动记录出自于 21 个台站所记录的 13 个不同地震动事件, 地震动加速度反应谱如图 3 (a) 所示, 矩震级在 6 级~8 级 ( $M_w$  6.0~ $M_w$  8.0) 范围内, 震中距离为 0~131.0 km。对于地下结构抗震问题, 直接选用地表地震动调幅作为基岩处的输入显然是不合适的。为此本文将自由场简化为一维均匀成层场地模型, 采用频域等效线性化方法对 21 条地震动进行反演, 如图 3 (b) 所示为反演后的基岩地震动反应谱, 之后将反演到基岩处的地震动进行调幅, 使得峰值加速度在 0.05g~0.8g, 输入到模型中进行增量动力分析。

3 模糊地震易损性曲线建立与对比

3.1 损伤状态划分及隶属度函数构建

如图 4 所示为本文 IDA 分析的计算结果, 本文以下卧基岩输入处的峰值加速度 PGA 以及最大层间位移角 MIDR 作为后续易损性分析的 IM 和 EDP。

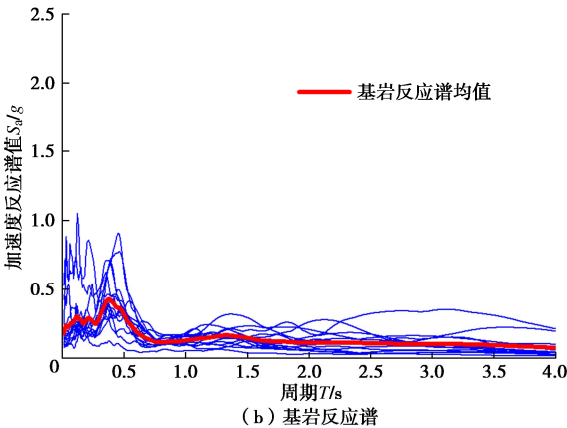
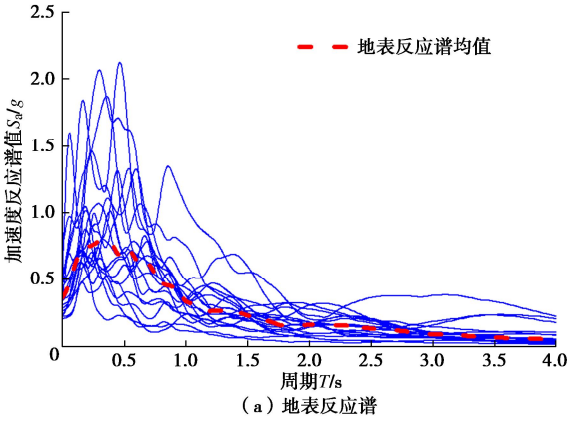


图 3 地震动加速度反应谱曲线

Fig. 3 Spectral curves of earthquake acceleration response

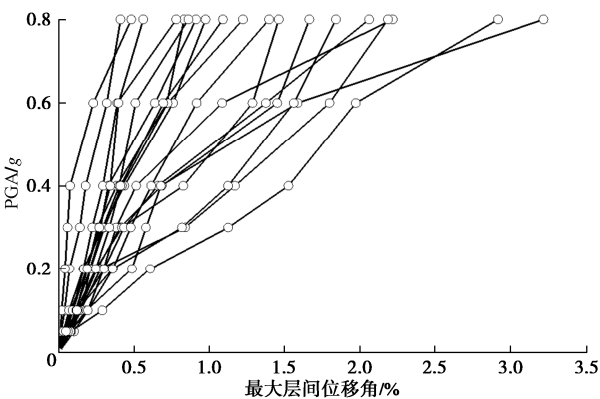


图 4 三层三跨地铁车站结构 IDA 曲线

Fig. 4 IDA curves of three-story and three-span metro station structures

Du 等<sup>[15]</sup>, 杜修力等<sup>[16]</sup>对 18 个地铁车站结构进行整体式 Pushover 分析得到了能力曲线样本, 通过几何作图法和概率统计方法标定了浅埋矩形框架地铁车站结构各性能水准下的层间位移角限值。本文借鉴杜修力等研究成果, 将结构损伤状态划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌 5 个阶段, 并给出地下结构不同损伤状态对应的层间位移角阈值, 如图 5 所示。



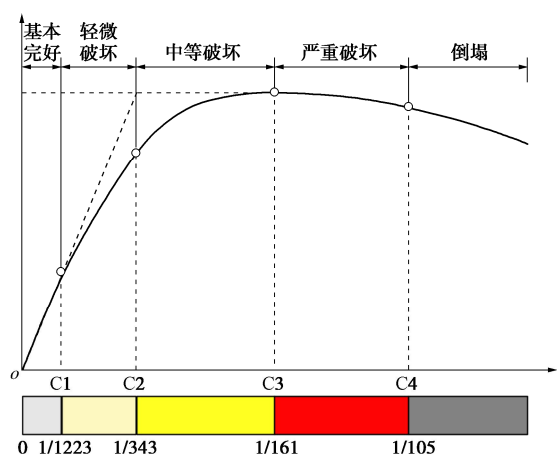


图 5 本文基于 MIDR 的地铁车站结构损伤状态定义

Fig. 5 Definition of damage states of subway station structures based on MIDR in this paper

如图 6 所示为根据图 5 和式 (1), (2) 建立的本文地铁车站结构损伤状态量化的三角形隶属度函数和拟正态形隶属度函数, 以及 MIDR 的总体频率分布情况。可以看出由于地震动的不确定性和较大地震动强度等级下土体和结构的强非线性, 导致 MIDR 在较小幅值地震动下集中分布于轻微破坏和中等破坏的损伤区间内; 而在较大幅值地震动下, MIDR 在严重损伤和倒塌损伤区间的分布较离散。

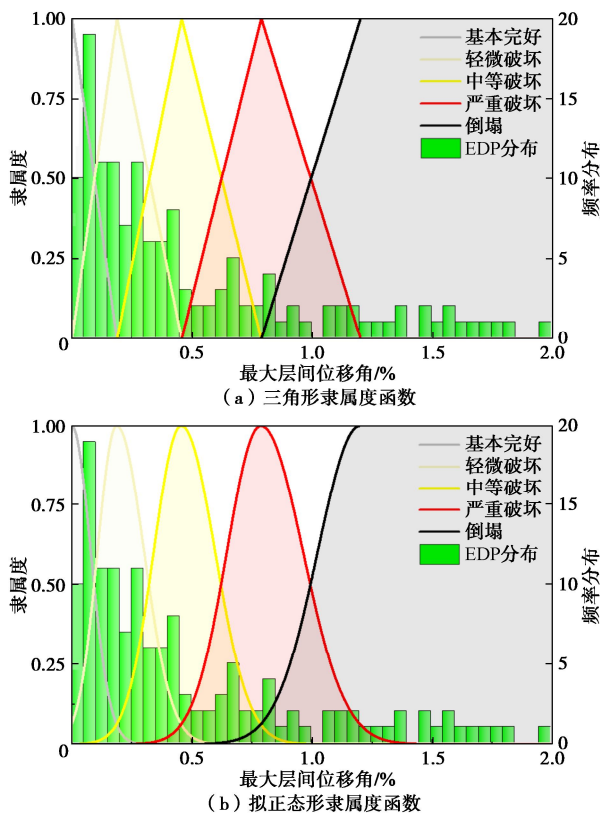


图 6 MIDR 的频率分布及损伤指标隶属度函数图

Fig. 6 Probability distribution and membership function of MIDR  
根据图 6 所示的隶属度函数, 可以计算得到结构

在某条地震动作用下的模糊综合评价矩阵。如表 3 所示为考虑和不考虑损伤界限模糊性时, 结构在 PGA 为 0.4g 时表 2 中的序号 21 地震动作用下的结构损伤评价矩阵。从表 3 中可以看出, 考虑损伤界限的模糊性, 在单条地震动作用下, 结构不再仅隶属于一种损伤状态, 而是以不同概率隶属于多种损伤状态。

表 3 单条地震动作用下的结构损伤评价矩阵 (以 PGA 为 0.4g 时的序号 21 地震动为例)

Table 3 Evaluation matrices of structural damage under single strip ground motion					
隶属度	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
不考虑模糊性	0	0	0	1.00	0
三角形隶属度函数	0	0	0	0.69	0.31
拟正态形隶属度函数	0	0	0.01	0.72	0.27

3.2 模糊失效概率计算及模糊易损性曲线建立

基于 IDA 分析结果和结构损伤区间的划分及相应结构损伤评价的隶属度函数矩阵, 通过式 (4)~(7) 可分别计算得到不同地震动强度等级下考虑和不考虑损伤界限模糊性结构处于各损伤状态的出现概率和超越概率, 如表 4, 5 所示。

根据表 4, 5 中的数据基于极大似然估计方法可以得到如表 6 所示的易损性曲线双参数。

将表 6 中的参数带入式 (5) 即可得到如图 7 所示的易损性曲线。

从图 7 中可以看出对于 II 类场地而言, 不考虑损伤界限模糊性对应给定损伤等级超越概率为 50% 的轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌的 PGA 值分别为 0.084g, 0.244g, 0.439g 和 0.613g, 考虑损伤界限模糊性时对应的 PGA 值分别为 0.071g, 0.261g, 0.492g 和 0.697g, 本文提出的模糊地震易损性曲线建立方法是有效合理的。

3.3 考虑损伤界限模糊性对地下结构地震易损性曲线的影响

为探究考虑与不考虑损伤界限模糊性的易损性曲线对地下结构模糊易损性分析结果的影响, 本文选用了两种具有代表性的隶属度函数形式与不考虑损伤界限模糊性的结果进行对比, 如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 隶属度函数形式对模糊易损性分析的结果影响很小, 这与 Li 等<sup>[19]</sup>, 王媛等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。考虑损伤界限模糊性的轻微破坏易损性曲线与不考虑时相比差异不大, 而中等破坏、严重破坏和倒塌时的易损性曲线有较大差异, 同等地震动

表 4 考虑损伤界限模糊性计算的不同地震动强度下各损伤状态的出现概率和超越概率（以三角形隶属度函数为例）

Table 4 Occurrence and exceeding probabilities of damage states under different ground motion intensities calculated considering their fuzzy probability (%)

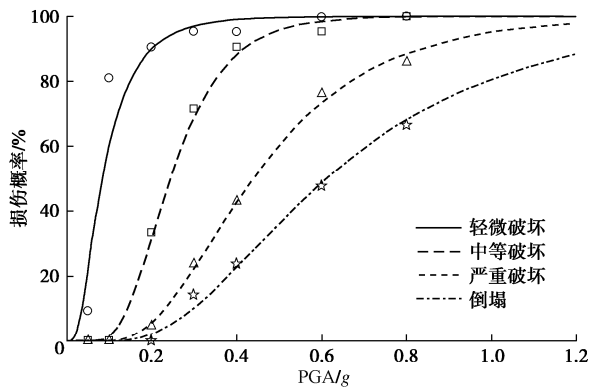
损伤 状态	峰值加速度 (PGA)						
	0.05g	0.1g	0.2g	0.3g	0.4g	0.6g	0.8g
基本完好	67.76/100	32.79/100	7.85/100	4.48/100	3.06/100	0/100	0/100
轻微破坏	32.24/32.24	63.91/67.21	61.57/92.15	33.06/95.52	17.64/96.94	8.67/100	0.79/100
中等破坏	0/0	3.30/3.30	27.20/30.57	40.36/62.46	44.61/79.30	28.21/91.33	17.90/99.21
严重破坏	0/0	0/0	3.37/3.37	14.23/22.11	16.87/34.69	20.84/63.13	25.18/81.31
倒塌	0/0	0/0	0/0	7.87/7.87	17.82/17.82	42.29/42.29	56.13/56.13

表 5 不考虑损伤界限模糊性计算的不同地震动强度下各损伤状态的出现概率和超越概率

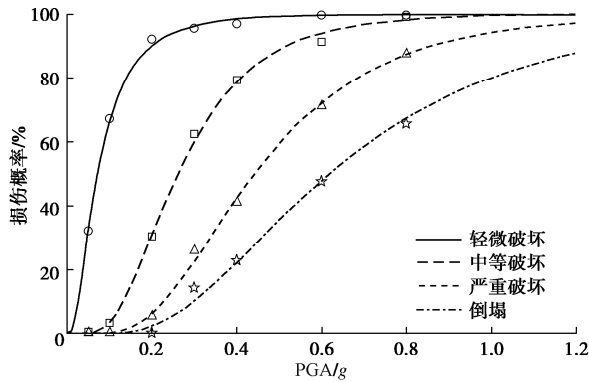
Table 5 Occurrence and exceeding probabilities of damage states under different ground motion intensities calculated considering their fuzzy probability (%)

损伤 状态	峰值加速度 (PGA)						
	0.05g	0.1g	0.2g	0.3g	0.4g	0.6g	0.8g
基本完好	90.48/100	19.05/100	9.52/100	4.76/100	4.76/100	0/100	0/100
轻微破坏	9.52/9.52	80.95/80.95	57.14/95.24	23.81/95.2	4.76/95.24	4.76/100	0/100
中等破坏	0/0	0/0	28.57/71.43	47.62/66.7	47.62/90.48	19.05/95.24	14.29/100
严重破坏	0/0	0/0	4.76/4.8	9.52/23.81	19.05/42.86	28.57/76.19	19.05/85.71
倒塌	0/0	0/0	0/0	14.29/14.29	23.81/23.81	47.62/47.62	66.67/66.67

注：“/”左右侧分别为给定损伤等级出现概率和超越概率。



(a) 不考虑损伤界限模糊性



(b) 考虑损伤界限模糊性（以线性型隶属度函数为例）

图 7 极大似然估计法拟合地铁车站结构地震易损性曲线

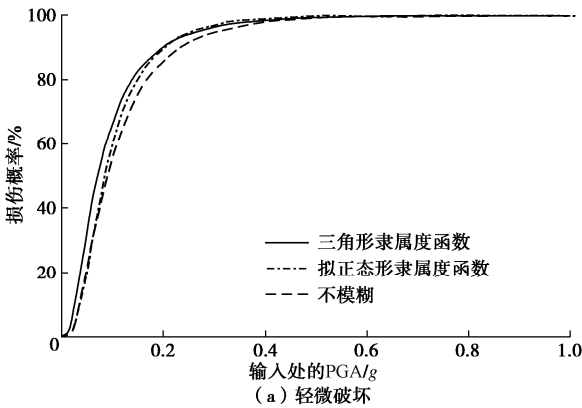
Fig. 7 Seismic fragility curves of subway station structure using maximum likelihood estimation method

强度下，考虑损伤界限模糊性结构发生中等破坏，严重破坏和倒塌的概率会显著降低。

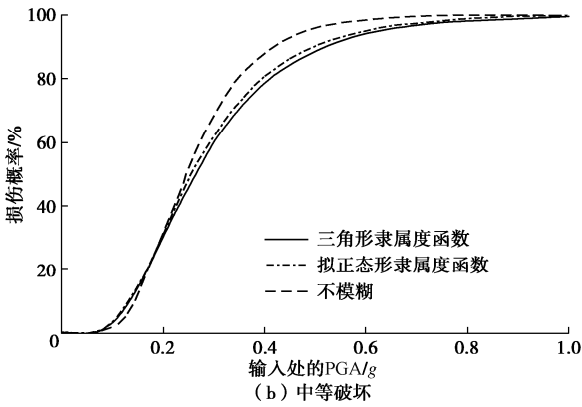
表 6 易损性曲线拟合参数

Table 6 Fitting parameters of fragility curves

拟合参数	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
$S_{m_i}$	模糊	0.071g	0.261g	0.492g
	不模糊	0.084g	0.244g	0.439g
$\beta$	模糊	0.807	0.532	0.543
	不模糊	0.683	0.419	0.501



(a) 轻微破坏



(b) 中等破坏

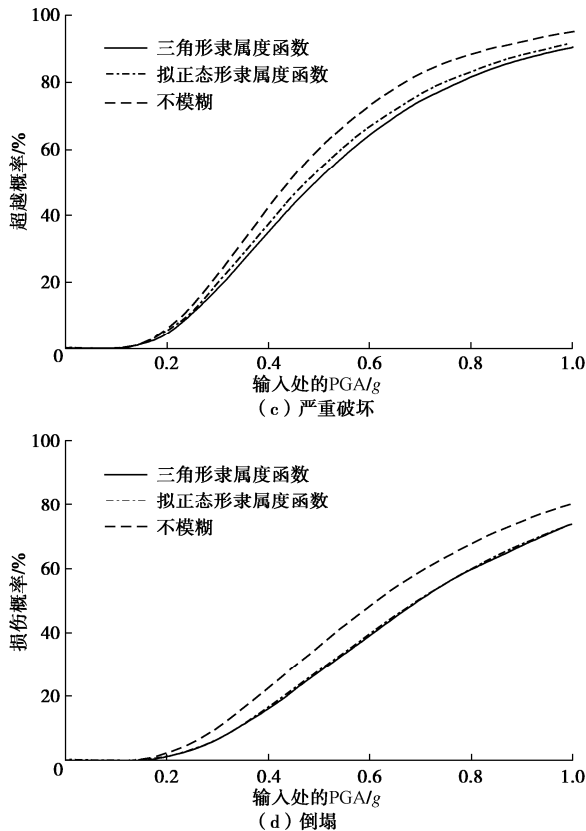


图 8 易损性曲线对比

Fig. 8 Comparison of fragility curves

如图 9 所示为以三角形隶属度函数为例的易损性曲线双参数的对比, 从图 9 (a) 中可以看出, 考虑损伤界限模糊性后, 中等破坏、严重破坏和倒塌破坏的地震动强度参数特征值  $S_{mi}$  均大于未考虑模糊性时的结果, 即考虑损伤界限的模糊性判断结构损伤会更倾向于安全; 图 9 (b) 中可以看出轻微破坏和中等破坏的对数标准差  $\beta$  显著增大, 说明考虑损伤界限的模糊性会大大增加易损性曲线的不确定性。

为量化隶属度函数的选取和损伤界限模糊性对易损性曲线形状的影响, 本文引入了基于“捏缩”策略<sup>[34]</sup>的敏感性分析指标:

$$SI = 100 \left( 1 - \frac{\text{unc}(T)}{\text{unc}(B)} \right) \quad (10)$$

式中  $\text{unc}(B)$  为同时考虑损伤界限模糊性和地震动不确定性的易损性曲线与不考虑不确定性, 即对数标准差取 0 时的易损性曲线之间的面积;  $\text{unc}(T)$  为仅考虑地震动不确定性时的易损性曲线与不考虑不确定性时易损性曲线之间的面积; SI 的值越大, 说明损伤界限模糊性对易损性曲线形状的影响越大, 如图 10 所示为敏感性分析结果。

图 10 的分析结果表明: 隶属度函数形式对不同损伤状态下模糊地震易损性曲线的影响平均小于 5%, 故对于本研究而言隶属度函数形式的影响可以忽略不

计; 考虑损伤界限的模糊性会使轻微破坏、中等破坏、严重破坏及倒塌易损性曲线的不确定性程度分别增加 7%, 27%, 15% 和 8% 左右; 所以结构损伤状态划分的不确定性应当引起重视。

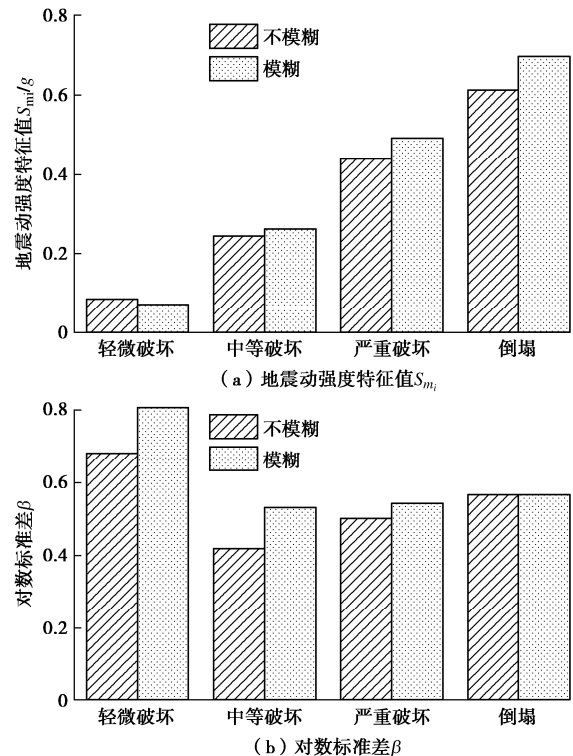


图 9 易损性曲线双参数对比

Fig. 9 Comparison of parameters of fragility curves

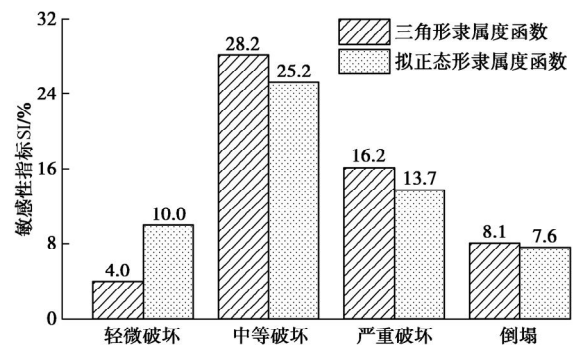


图 10 损伤界限模糊性对易损性分析的影响程度

Fig. 10 Influence degrees of fuzzy damage states on fragility analysis

## 4 结 论

鉴于现阶段地下结构抗震性能评价和易损性分析当中损伤状态划分不确定性的考虑不充分, 本文提出将模糊综合评价方法与基于 IDA 方法的地下结构易损性分析相结合, 以二类场地三层三跨地铁车站结构为例, 建立了考虑损伤界限模糊性的易损性曲线, 得到 3 点结论。

(1) 本文提出的模糊综合评价方法可以有效地计



算不同地震动强度等级下结构相应损伤状态的失效概率,并结合极大似然估计方法建立易损性曲线。

(2)考虑损伤界限的模糊性,会进一步增加结构地震易损性曲线的离散性;同等地震动强度下,结构发生中等破坏、严重破坏和倒塌破坏的概率会降低,因此,本文所建立的考虑损伤界限模糊性的地下结构地震易损性曲线在评价结构地震损伤时更趋于安全。

(3)采用两种典型的隶属度函数建立了模糊易损性曲线,结果表明隶属度函数类型的选取对模糊地震易损性分析结果的影响不大于5%,可忽略不计。

### 参考文献:

- [1] 杜修力,李洋,许成顺,等. 1995年日本阪神地震大开地  
铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展[J]. 岩土工程学  
报, 2018, 40(2): 223 - 236. (DU Xiu-li, LI Yang, XU  
Cheng-shun, et al. Review on damage causes and disaster  
mechanism of Daikai subway station during 1995  
Osaka-Kobe Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical  
Engineering, 2018, 40(2): 223 - 236. (in Chinese))
- [2] TSINIDIS G, DE Silva F, ANASTASOPOULOS I, et al.  
Seismic behaviour of tunnels: from experiments to analysis[J].  
Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99:  
103334.
- [3] ZHONG Z L, SHEN Y Y, ZHAO M, et al. Seismic fragility  
assessment of the Daikai subway station in layered soil[J].  
Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 132:  
106044.
- [4] FEMA P58-1, Seismic Performance Assessment of  
Buildings[R]. Washington: Federal Emergency Management  
Agency, 2018.
- [5] WILLIAMS M S, SEXSMITH R G. Seismic damage indices  
for concrete structures: a state-of-the-art review[J].  
Earthquake Spectra, 1995, 11(2): 319 - 349.
- [6] 黄忠凯, 张冬梅. 地下结构地震易损性研究进展[J]. 同济  
大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 49 - 59, 115. (HUANG  
Zhong-kai, ZHANG Dong-mei. Recent advance in seismic  
fragility research of underground structures[J]. Journal of  
Tongji University (Natural Science), 2021, 49(1): 49 - 59,  
115. (in Chinese))
- [7] ARGYROUDIS S A, PITILAKIS K D. Seismic fragility  
curves of shallow tunnels in alluvial deposits[J]. Soil  
Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 35: 1 - 12.
- [8] NGUYEN D D, PARK D, SHAMSHER S, et al. Seismic  
vulnerability assessment of rectangular cut-and-cover subway  
tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,  
2019, 86: 247 - 261
- [9] HE Z M, CHEN Q J. Vertical seismic effect on the seismic  
fragility of large-space underground structures[J]. Advances  
in Civil Engineering, 2019, 2019: 9650294.
- [10] JIANG J W, EL Nggar H M, XU C S, et al. Effect of ground  
motion characteristics on seismic fragility of subway  
station[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021,  
143: 106618.
- [11] 钟紫蓝, 申铁尧, 郝亚茹, 等. 基于 IDA 方法的两层三跨  
地铁地下结构地震易损性分析[J]. 岩土工程学报, 2020,  
42(5): 916 - 924. (ZHONG Zi-lan, SHEN Yi-yao, HAO  
Ya-ru, et al. Seismic fragility analysis of two-story and  
three-span metro station structures based on IDA method[J].  
Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5):  
916 - 924. (in Chinese))
- [12] 钟紫蓝, 严智豪, 史跃波, 等. 基于 IDA 方法的地铁车站  
结构抗震性能评价[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(7):  
680 - 690. (ZHONG Zi-lan, YAN Zhi-hao, SHI Yue-bo, et al.  
Seismic performance evaluation of station structures based on  
IDA method[J]. Journal of Beijing University of Technology,  
2021, 47(7): 680 - 690. (in Chinese))
- [13] 钟紫蓝, 申铁尧, 甄立斌, 等. 地震动强度参数与地铁车  
站结构动力响应指标分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3):  
486 - 494. (ZHONG Zi-lan, SHEN Yi-yao, ZHEN Li-bin, et  
al. Ground motion intensity measures and dynamic response  
indexes of metro station structures[J]. Chinese Journal of  
Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 486 - 494. (in  
Chinese))
- [14] LIU T, CHEN Z Y, YUAN Y, et al. Fragility analysis of a  
subway station structure by incremental dynamic analysis[J].  
Advances in Structural Engineering, 2017, 20(7):  
1111 - 1124.
- [15] DU X L, JIANG J W, EL NAGGAR M H, et al. Interstory  
drift ratio associated with performance objectives for  
shallow-buried multistory and span subway stations in  
inhomogeneous soil profiles[J]. Earthquake Engineering &  
Structural Dynamics, 2021, 50(2): 655 - 672.
- [16] 杜修力, 蒋家卫, 许紫刚, 等. 浅埋矩形框架地铁车站结  
构抗震性能指标标定研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10):  
111 - 119, 128. (DU Xiu-li, JIANG Jia-wei, XU Zi-gang, et  
al. Study on quantification of seismic performance index for  
rectangular frame subway station structure[J]. China Civil  
Engineering Journal, 2019, 52(10): 111 - 119, 128. (in  
Chinese))

- [17] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, **8**(3): 338 – 353.
- [18] THINLEY K, HAO H. Seismic performance of reinforced concrete frame buildings in Bhutan based on fuzzy probability analysis[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, **92**: 604 – 620.
- [19] LI Z F, WU Z Y, CHEN J K, et al. Fuzzy seismic fragility analysis of gravity dams considering spatial variability of material parameters[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, **140**: 106439.
- [20] 王媛, 李泽发, 吴震宇, 等. 考虑损伤状态阈值模糊性的重力坝地震易损性分析[J]. *工程科学与技术*, 2020, **52**(2): 110 – 120. (WANG Yuan, LI Ze-fa, WU Zhen-yu, et al. Seismic fragility analysis of gravity dams considering the fuzziness of damage states thresholds[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, **52**(2): 110 – 120. (in Chinese))
- [21] 何浩祥, 李瑞峰, 闫维明. 基于多元模糊评定的桥梁综合地震易损性分析[J]. *振动工程学报*, 2017, **30**(2): 270 – 279. (HE Hao-xiang, LI Rui-feng, YAN Wei-ming. Bridge seismic fragility analysis method based on multiple fuzzy evaluation[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2017, **30**(2): 270 – 279. (in Chinese))
- [22] GU X M, LU Y. A fuzzy-random analysis model for seismic performance of framed structures incorporating structural and non-structural damage[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2005, **34**(10): 1305 – 1321.
- [23] COLANGELO F. A simple model to include fuzziness in the seismic fragility curve and relevant effect compared with randomness[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, **41**(5): 969 – 986.
- [24] WU C Q, HAO H, ZHOU Y X. Fuzzy-random probabilistic analysis of rock mass responses to explosive loads[J]. *Computers and Geotechnics*, 1999, **25**(4): 205 – 225.
- [25] BAKER J W. Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis[J]. *Earthquake Spectra*, 2015, **31**(1): 579 – 599.
- [26] SHINOZUKA M, FENG M Q, LEE J, et al. Statistical analysis of fragility curves[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, **126**(12): 1224 – 1231.
- [27] STORN R, PRICE K. Differential evolution—A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, **11**: 341 – 359.
- [28] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. (Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures: GB50909—2014[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2014. (in Chinese))
- [29] 曲哲, 叶列平. 基于有效累积滞回耗能的钢筋混凝土构件承载力退化模型[J]. *工程力学*, 2011, **28**(6): 45 – 51. (QU Zhe, YE Lie-ping. Strength deterioration model based on effective hysteretic energy dissipation for rc members under cyclic loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, **28**(6): 45 – 51. (in Chinese))
- [30] BARDET JP, ICHII K, LIN CH. EERA—A computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses[R]. Los Angeles: Department of Civil Engineering, University of Southern California, 2000.
- [31] 杜修力, 许紫刚, 许成顺, 等. 基于等效线性化的土-地下结构整体动力时程分析方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(12): 2155 – 2163. (DU Xiu-li, XU Zi-gang, XU Cheng-shun, et al. Time-history analysis method for soil-underground structure system based on equivalent linear method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(12): 2155 – 2163. (in Chinese))
- [32] TSINIDIS G, PITILAKIS K, TRIKALIOTI A D. Numerical simulation of round robin numerical test on tunnels using a simplified kinematic hardening model[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, **9**(4): 641 – 659.
- [33] VAMVATSIKOS D, FRAGIADAKIS M. Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2009: 141 – 163.
- [34] FERSON S, TUCKER W T. Sensitivity analysis using probability bounding[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2006, **91**(10/11): 1435 – 1442.