

地下结构地震易损性研究进展

黄忠凯^{1,2}, 张冬梅^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了促进国内地下结构地震易损性分析的发展和应
用,详细评述了地下结构地震易损性分析在国内外研究现
状、存在的问题和未来发展方向。首先,介绍了地震易损性
的定义,总结了破坏指标、地震动强度参数的选取以及不确
定性的影响,归纳了常用的 2 种地下结构易损性曲线建立方
法。依据不同来源的分析数据,介绍了 5 种国内外常用的地
下结构地震易损性分析方法,归纳了每种方法的适用性及优
缺点。最后,分析了当前研究中遇到的问题以及存在的局限
性,对地下结构地震易损性研究的发展方向进行了展望。

关键词: 地下结构;地震易损性分析;破坏指标;地震动强度
参数;分析方法

中图分类号: TU435

文献标志码: A

Recent Advance in Seismic Fragility Research of Underground Structures

HUANG Zhongkai^{1,2}, ZHANG Dongmei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground
Engineering of the Ministry of Education, Tongji University,
Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji
University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to facilitate the development and
application of the seismic fragility analysis of underground
structures in China, this paper presents a review of recent
advance in seismic fragility research of underground
structures, the existing issues and future tendency of this
research topic are also discussed. Firstly, the definition of
seismic fragility is described. Then, the selection of
damage measure and intensity measure, as well as the
effect of uncertainties, are discussed respectively. Two
most widely-used methods for the construction of fragility
curves in underground structures are introduced later.
Based on the different sources of analysis data for the

fragility analysis, five common used seismic fragility
analysis methods for underground structures were
summarized, and their applicability are also presented.
Finally, the existing issues and the future tendency of
seismic fragility analysis of underground structures are
discussed.

Key words: underground structures; seismic fragility
analysis; damage measure; intensity measure; analysis
method

自日本 1995 年发生阪神大地震后^[1-5],结构抗震
安全性引起了人们更多的重视。美国太平洋地震工
程研究中心建立了一个全新的基于性能的地震工程
全概率分析框架,主要包含地震危险性分析、结构地
震需求分析、地震易损性分析、经济损失分析 4 个分
析模块^[6-7]。其中地震易损性表达了结构在不同地
震动强度下,地震需求达到或超越不同破坏状态的
条件概率^[8-10]。该框架可以对结构抗震性能展开定
量分析,充分展现了新一代基于性能的抗震设计分
析理念,相关研究可为地下结构灾后应急响应策略
及经济损失估计等提供参考。

在过去,人们认为地下结构在地震下相对安全,
但是近年来,已发生了多起地震导致的地下结构严
重破坏甚至坍塌事件^[11],如 1995 年日本阪神 7.3 级
地震^[1-5,12]、1999 年土耳其 Duzce 7.2 级地震^[13-14]、
1999 年我国台湾集集 7.3 级地震^[15-17]以及 2008 年汶
川 8.0 级地震^[18-20]等,造成了巨大的经济损失。因
此,为了合理评估其抗震性能,各国学者已针对地下
结构地震易损性展开了一定研究。

目前,地下结构地震易损性分析经历了 5 个不

收稿日期: 2020-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(52090082,41772295,51978517);上海市教委重大项目(2019-01-07-00-07-456 E00051);
科技部创新人才推进计划重点领域创新团队项目(2016RA4059)

第一作者: 黄忠凯(1992—),博士后,工学博士,主要研究方向为地下结构抗震。

E-mail: 5huangzhongkai@tongji.edu.cn

通信作者: 张冬梅(1975—),教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为盾构隧道安全评估。

E-mail: dmzhang@tongji.edu.cn



论
文
拓
展
介
绍

同的发展阶段,分别为专家判断法(2001年至今)、历史震害调查法(2004年至今)、数值法(2003年至今)、实验数据法(2016年至今)以及混合分析法(正在发展)等5种。其中,第1阶段主要为专家判断法,该方法通过发放问卷获得专家判断意见结果,采用统计方法建立了经验性地下结构地震易损性曲线^[21-22];第2阶段中,学者们主要采用历史震害调查法,该方法通过收集震害调查报告中的地下结构破坏统计数据,从而建立相应的地震易损性曲线^[23-26];随着计算能力的发展,在第3阶段中,学者们广泛采用基于数值法的地震易损性分析,在早期,基于能力谱的地震易损性分析较为实用^[27],其后随着计算能力的发展,学者们开始利用拟静力分析展开大规模计算,对隧道及地下车站建立了初步的地震易损性曲线^[28-33],而近年来,由于计算能力的巨大提升,基于非线性动力分析法被学者们广泛使用,针对隧道^[34-49]、地下车站^[50-52]、综合管廊^[53]以及其他设施^[54-57]建立了一系列结构地震易损性曲线;第4阶段则发展了基于实验数据法的地震易损性分析,该方法通过大量实验获得地下结构破坏数据,再利用统计方法建立相应的地震易损性曲线^[58];而第5阶段则是面向未来的基于混合分析法的地震易损性分析^[59-61],该方法可以将专家判断、历史震害数据、有限元计算结果或相关试验结果信息有机地利用起来,避免了数值分析中的大规模计算以及随之带来的大量不确定性,同时减少了专家判断带来的主观性影响,使得分析结果更为可靠,未来将在地下结构地震易损性分析中广泛使用。

本文首先给出了地下结构地震易损性的定义,总结了破坏指标、地震动强度参数的选取,以及不确定性因素的影响,详细归纳了目前国内外地下结构地震易损性研究的工作进展,归纳了各种易损性分析方法的适用范围和优缺点,指出该领域存在的问题和不足,并对地下结构地震易损性研究的发展方向进行了展望。

1 地下结构地震易损性分析概念

地下结构地震易损性研究的主要目的在于地震易损性曲线的建立,本节介绍地下结构地震易损性定义、破坏指标及地震动强度参数选取方法、不确定性因素以及易损性曲线参数的估计方法的相关研究。

1.1 地下结构地震易损性定义

地震易损性表达了地下结构在不同地震强度 E 下超越不同破坏状态的条件概率。图1给出了地震易损性曲线的示意图,该曲线能从概率的角度来定量表达地下结构的抗震性能。与建筑工程^[62-66]和桥梁工程^[67-69]地震易损性分析类似,地下结构地震易损性曲线可采用双参数对数分布模型表示,如式(1)所示:

$$P(s \geq s_j | E) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_j} \cdot \ln \left(\frac{E}{E_j} \right) \right] \quad (1)$$

其中 s 为破坏状态, P 为超越某破坏状态 s_j 的概率, E 为地震强度大小, F 是标准正态分布累积概率函数, E_j 是第 j 个破坏状态对应的地震强度, β_j 是第 j 个破坏状态对应的对数标准差,表达了易损性曲线的变异性。由式(1)可知,易损性曲线建立取决于2个关键参数,即 E_j 和 β_j ,下文详细介绍2种常用的关键参数 E_j 和 β_j 估计方法。

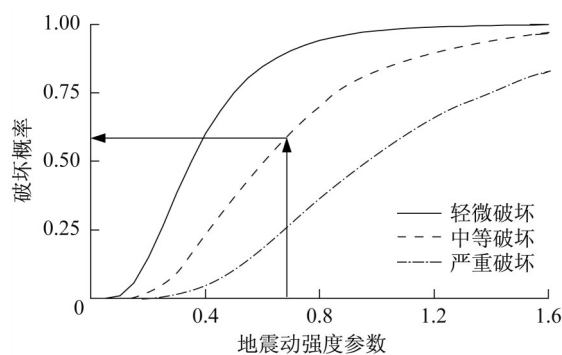


图1 地震易损性曲线

Fig.1 Seismic fragility curve

1.2 地下结构破坏指标

地下结构受到周围岩土介质约束,其破坏特性与地表结构有着明显差异。地下结构破坏类型根据触发原因不同可以划分为2类,其一:周围岩土介质的振动和变形引发的如地下结构弯曲破坏、剪切破坏、弯剪联合破坏、挤压变形和剪切变形等;其二:受地下结构周围岩土介质失效(如砂土液化以及断层错动等影响)引起的地下结构破坏^[70-72]。在地下结构地震易损性分析中,结构破坏状态和破坏指标 W 的选取十分重要,且和上述2种破坏类型密切相关。对于经验易损性曲线,地下结构的破坏状态可由定性描述确定,如有无裂缝、破损、渗漏水或掉块情况等;而对于解析易损性曲线,地下结构的破坏状态则可根据破坏分析进行定量描述。通常,定量描述结构破坏的准则有强度、变形、能量等破坏准则。目前

地下结构地震易损性分析中较多采用强度和变形破坏准则,但不同的破坏指标有其相应的适用结构类型。因此,本文通过国内外文献调研,统计了目前既有地下结构地震易损性分析文献中所使用的破坏指

标和破坏状态,如表 1 所示,主要基于强度和变形破坏准则 2 个分类及圆形隧道、矩形车站、地下车库和综合管廊等 4 种代表性城市地下结构,破坏指标 W 定义的相关公式可见表 1 中给出的参考文献。

表 1 地下结构破坏指标及破坏状态

Tab.1 The damage state and damage index of underground structures

破坏准则	破坏指标	结构类型	破坏状态划分	对应文献
强度屈服准则	关键横截面真实弯矩与其弯矩承载力之比	圆形隧道、矩形车站、综合管廊	无、轻微、中等、严重及完全破坏 5 种状态	[28-30]、[32-33]、[35-43]、[73-74]
	衬砌混凝土真实应力与极限应力之比	圆形隧道	无、轻微、中等、严重、极其严重和完全破坏等 6 种状态	[46]
变形屈服准则	隧道横向收敛变形率	圆形隧道	无、轻度、中等和严重 4 种状态	[34]、[44-45]、[49]
	隧道接头转角	圆形隧道	无、轻微、中等和严重破坏 4 种状态	[75]
变形屈服准则	最大层间位移角	矩形车站	可运行、轻微破坏、安全保障和倒塌保护 4 种状态	[31]、[50-52]、[55]
	地下车库柱子塑性转角	地下车库	完全可用、基本可用、修复可用和生命安全 4 种状态	[56]
	综合管廊关键节点水平和竖向位移	综合管廊	基本完好、轻微损坏、生命安全和防止倒塌 4 种状态	[53]

由表 1 可知,基于变形屈服准则的破坏指标较多,有 5 种,而基于强度破坏准则的破坏指标较少,仅有 2 种;从不同结构类型角度,圆形隧道的破坏指标最多,而其他 3 种代表性结构类型的破坏指标则较少。在这些破坏指标中,基于截面抗弯承载力的破坏指标最为常用^[28-30,35-43],目前已被用于圆形隧道、矩形车站及综合管廊 3 种代表性结构的地震易损性分析中,适用性较广。该指标由 Argyroudīs 和 Pitilakis^[29]首次提出,他们将其定义为地下结构关键横截面真实弯矩(M)与其弯矩承载力(M_R)之比。其中,地下结构关键截面真实弯矩(M)由静荷载和地震动荷载得到,地下结构关键截面弯矩承载力(M_R)根据截面材料特性以及产生的截面地震轴力(N)由极限状态分析得到。地下结构 5 个不同等级破坏状态即无破坏、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏的阈值如表 2 所示。

1.3 地震动强度参数

地震动强度参数 E 的选取是地下结构地震易损

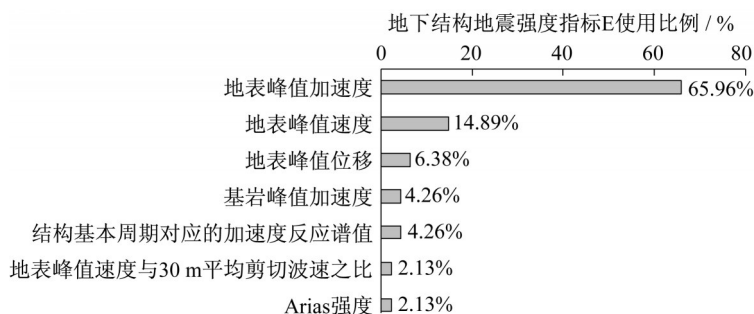
表 2 基于抗弯承载力的破坏指标^[29]

Tab.2 The damage index based on the bending moment capacity^[29]

破坏状态	破坏指标范围	破坏指标中间值
无破坏 s_0	$M/M_R \leq 1.0$	
轻微破坏 s_1	$1.0 < M/M_R \leq 1.5$	1.25
中等破坏 s_2	$1.5 < M/M_R \leq 2.5$	2.00
严重破坏 s_3	$2.5 < M/M_R \leq 3.5$	3.00
完全破坏 s_4	$M/M_R \geq 3.5$	

性曲线建立中的一个关键因素。地震动强度特点、频谱特征和持时特性是决定地震动破坏强度的关键影响因素,结构地震易损性研究中常用的地震动参数 E 需要体现地震波的这 3 个特性。图 2 给出了目前统计到的不同学者采用的地震动参数 E 的使用比例。可以发现,地表峰值加速度 PGA 使用者最多,占比达 65.96%,该参数较容易获得,使用最广泛;其次是 PGV 和 PGD,占比分别为 14.89% 和 6.38%,其他地震动强度参数如 Arias 强度 I_a 则使用相对较少。

上述结果表明,目前地表峰值加速度 PGA 最为常用,且是世界各国抗震设计规范中常用的参数。但是,从过去收集的现场震害案例统计^[23]中得知,在有些案例中峰值加速度 PGA 很高,但是结构的破坏程度却较轻;有些案例的峰值加速度 PGA 很小,但却引起结构较为严重的破坏。Huang 等^[38]的研究也表明,对于软土地区浅埋隧道工况,相较于峰值速度 PGV,峰值加速度 PGA 与破坏指标 W 的相关性更大,此时 PGA 是地震易损性分析中更合适的地震强度参数;而对于软土地区深埋隧道工况,相较于峰值速度 PGV,峰值加速度 PGA 与破坏指标 W 的相关性却更小,此时 PGV 是地震易损性分析中更合适的地震强度参数。可见,对于不同的地下结构工况,地震动峰值加速度 PGA 未必是最为理想的地震强度参数^[76]。

图2 地下结构地震强度指标 E 使用比例Fig.2 The usage percentage of seismic intensity measure E for underground structure

1.4 地下结构地震易损性曲线参数的估计方法

由式(1)和上述讨论可知,参数 E_j 和 b_j 是建立易损性曲线的关键,基于式(1),可以采用不同的统计学方法对这2个参数进行估计,目前各国学者采用的估计方法有所不同,总体上可以将地下结构易损性参数估计归纳为“云图法”和“极大似然估计法”2种类型。在其他研究领域如建筑工程和桥梁工程易损性分析中,“需求能力比对数回归法”和“缩放法”等方法也被广泛运用。

1.4.1 云图法

目前,使用最多的地下结构易损性参数的估计方法是“云图法”^[28-31]。Shome 和 Cornell^[77]最先提出了基于“云图法”的选取地震波方法,地震波的选取是其中较为关键的一个步骤,选取的地震波需体现地震波3个固有特性,即频谱、振幅及持时特性等,同时要与研究场地的地震危险性相吻合。结构地震需求假设满足对数正态分布^[78],而工程需求参数(engineering demand parameters, G)与地震强度参数 E 之间的关系可以用式(2)表示:

$$\ln G = a \cdot \ln E + b \quad (2)$$

式(2)即为地下结构概率地震需求模型,其中参数 a 和 b 可以通过数据拟合回归得到,拟合过程一般可以用图3所示方法。图3中离散数据点为数值分析中不同地震强度参数对应的工程需求参数 G ,实线为式(2)对应的概率地震需求模型。其中,拟合得到的概率地震需求模型与实际对应计算数据点之间的离散程度如图中2条虚线表示,其离散程度大小可用对数标准差 β 表示,如式(3)所示:

$$\beta \cong \sqrt{\frac{\sum (\ln g_i - \ln G)^2}{N - 2}} \quad (3)$$

式中: β 为概率地震需求模型的对数标准差, g_i 为第 i 条地震波作用下的地下结构地震响应最大值, N 为计算数据点个数。

利用上述建立的拟合式(2)及不同破坏状态对

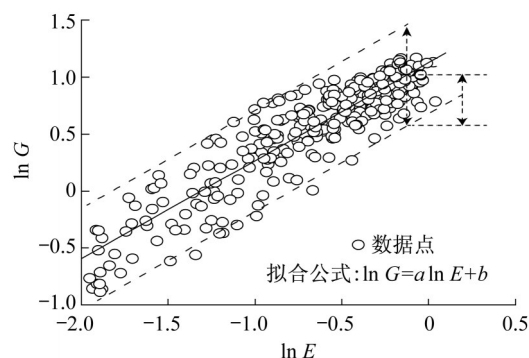


图3 基于“云图法”的地震易损性曲线建立

Fig.3 The construction of seismic fragility curve based on the cloud method

应的破坏指标阈值,可以计算得到不同破坏状态地震易损性曲线参数 E_j ,通过式(3)可以获得地震易损性曲线的对数标准差 β_j ,从而可以建立不同破坏状态对应的地下结构地震易损性曲线。

1.4.2 极大似然估计法

另外一种使用较多的方法为“极大似然估计法”^[31]。地下结构破坏状态可分为无破坏、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏5种级别,不同破坏状态用 s_j ($j=1,2,3,4,5$) 表示。假定地震易损性曲线符合两参数对数正态分布,如式(1)所示。对于不同破坏状态,需分别估计破坏指标中值对应的地震强度参数 E_j 和对数标准差 β_j 。其中,破坏状态 s_j 下易损性曲线的似然函数 $L(E_j, \beta_j)$ 如式(4):

$$L(E_j, \beta_j) = \prod_{i=1}^N [P_j(e)]^l [1 - P_j(e)]^{(1-l)} \quad (4)$$

式中,当地震动强度水平 $E=e$ 时,如果发生破坏状态 s_j ,则 $l=1$,否则 $l=0$ 。因此,通过对似然函数式(4)求极大值,可以获得破坏状态中值对应的地震强度参数 E_j 和对数标准差 β_j 的极大似然估计值。

1.5 地下结构地震易损性分析中的不确定性

能够考虑各种不确定性因素是地震易损性分析

的优点之一^[65,79],一般地,不确定性可分为本质不确定性 (aleatory uncertainty) 和知识不确定性 (epistemic uncertainty)^[80]。其中,本质不确定性体现了事物本身的内在随机性和不可预测特征,比如地震震级大小或震中距位置等,这一类不确定性是天然的且无法完全消除;知识不确定性反应的是人们现有认知水平不足,比如,研究者进行地震易损性分析时,建立的数值模型存在各种假设条件,或计算样本数量选取有所不同,这类不确定性会随着研究者认知水平的提高而减小。

地震易损性分析中一般会涉及上述2类不确定性,目前国内外研究人员主要考虑了地震动和材料参数不确定性的影响,其中地震动不确定性属于本质不确定性,而材料不确定性为知识不确定性。比如,Argyroudis等^[28-29]以及后续其他学者的研究^[30-58]都考虑了地震动不确定性的影响,建立了相应的地下结构地震易损性曲线。Huang等^[41]针对山区岩石隧道,考虑地震动、衬砌和围岩材料等不确定性,首次利用均匀设计法和支持向量机方法建立了地震易损性曲线。上述研究成果突出了不确定性在地下结构地震易损性分析中的重要性。

2 国内外地下结构地震易损性分析研究现状

在地下结构领域,ALA (American Lifelines Alliance)^[23]最早给出了经验性隧道地震易损性曲线,之后,相关地震易损性分析不断展开。目前地下结构地震易损性分析主要可分为5种:①基于专家判断的地震易损性分析;②基于历史震害调查的经验地震易损性分析;③基于数值法的地震易损性分析;④基于实验数据的地震易损性分析;⑤混合地震易损性分析。下文从这5个方面对国内外地下结构地震易损性分析的研究现状展开叙述。

2.1 基于专家判断的地震易损性分析

该方法通过专家调查问卷形式展开,统计不同学者在地下结构不同破坏状态下的意见建立地震易损性曲线。NIBS (National Institute of Building Science)^[21]基于专家判断法和有限的经验数据集^[22],根据裂缝宽度、掉块情况等定性划分不同破坏状态,提出了基于地表峰值加速度PGA的地震易损性曲线。但是,该方法存在一定的局限性:①该分析方法在早期缺乏足够现场震害数据和有效模拟计算方法时较为适用,且成本较低,但随着时代的前进,

该方法已不能满足实际工程需要;②该方法过于依赖专家意见的统计结果,专家意见包含一定的主观性,同时,专家判断意见的反馈率也会对最终结果造成一定的影响;③地下结构在地震荷载下的破坏状态是一个高度随机问题,通过专家调查法展开的易损性分析往往会高估或低估最终结果。

2.2 基于历史震害调查的地震易损性分析

该方法主要依据历史震害调查得到的地下结构破坏数据和相应的地震动强度参数分布信息,较适用于有完整的震害调查报告和地震动记录数据的地区,比如中国西部地区和美国加利福尼亚州等地区。一些学者和工程师利用上述地区的地下结构震害调查报告对地下结构展开了经验易损性分析。其中,ALA^[23]以全世界隧道破坏案例数据为基础,利用统计回归方法获得了不同类型隧道的经验易损性曲线。国内学者范刚等^[25]根据2008年汶川大地震的相关隧道震害调查资料,建立了隧道洞口段、断层破碎段和普通段的地震易损性曲线。

该方法利用震害调查报告中的地下结构破坏统计信息展开分析,分析流程明确简洁,但是,该方法存在以下3个方面的限制,使得难以在全球范围内进行推广:①分析结果严重依赖地下结构震害数据的样本大小,需要足够的样本量且需保证样本的有效性;②目前相关地下结构历史震害统计或地震动空间分布信息的现实案例较少,尤其是针对城市区域地铁隧道、地下商场等结构;③通过该方法获得的地震易损性曲线,往往是各种场地地震易损性曲线的平均化结果,因此,难以表达特定场地特定类型的地下结构易损性。

2.3 基于数值法的地震易损性分析

随着计算机计算能力的提升,基于数值法的地下结构易损性分析已经变得越来越普遍。学者们可以考虑不同来源及数量的地震波,建立不同的数值模型展开破坏分析,该方法具有良好的可控性和可重复性,已替代前2种分析方法成为建立地下结构易损性曲线的主要选择。目前,在基于数值法的地下结构地震易损性分析领域,已经发展出较多的理论方法,本文根据数值计算方法的不同,按能力谱方法 (Capacity Spectrum Method)、非线性静力分析方法和非线性动力分析方法进行归纳。

2.3.1 能力谱方法

早期,弹性反应谱方法普遍用于易损性分析,该方法具有简洁和高效率的优点,但是,当结构地震响应较为复杂,且包含非线性现象时,其计算结果误差

较大,获得的易损性曲线精度难以保证。因此,相关学者发展了能力谱方法,该方法通过结构的能力需求谱来获得相应的能力需求点,克服了弹性反应谱的限制,能够考虑非线性问题,计算得到的易损性曲线更准确。如 Salmon 等^[27]对美国旧金山 BART (San Francisco Bay Area Rapid Transit) 系统展开了易损性分析,采用能力谱分析方法,以永久性位移及裂缝宽度等进行破坏状态划分,分别获得了明挖法隧道以及 14 个 BART 地下车站的地震易损性曲线。该系列地震易损性曲线具有一定的工程意义,给旧金山 BART 系统的地震风险分析提供了重要参考。

能力谱方法计算效率较高,且能在一定程度考虑结构非线性行为,但是,该方法存在一定的限制,如下所述:①忽略了土-结构接触 (soil-structure interaction, SSI) 现象,因此,其计算结果的准确度有待商榷;②难以考虑实际地震波中不同地震入射角度、震源类型、震中距等的影响。

2.3.2 精细化静力分析方法

土-结构接触 SSI 和地震动不确定性是地下结构地震性能分析的重要影响因素,能力谱方法不能有效考虑上述因素。因此,相关学者提出了基于精细化静力分析的易损性分析方法,该方法首先采用一维场地地震反应分析获得不同地震等级下土层沿深度方向的最大横向位移值或加速度时程,继而将上述位移或加速度时程施加到二维有限元模型中,一般有 3 种处理方法:①建立的有限元模型包含土层及地下结构,该横向位移值施加于模型侧向边界,以此来模拟地震荷载;②建立的有限元模型无土层仅有地下结构,在地下结构周围采用弹簧来模拟土-结构接触现象,横向位移值施加于模型侧向弹簧;③第 3 种处理方法是将一维场地地震反应分析得到的各层土层加速度时程转化为体力施加到二维模型边界,该方法能够考虑土体及结构非线性现象、土-结构接触、地震动不确定性影响等,相对于全动力分析方法计算量相对较小。国内外学者利用该方法获得了大量地下结构地震易损性曲线。Argyroudis 和 Pitilakis^[29]对冲击土中的浅埋圆形隧道及矩形隧道展开分析,建立了相应的地震易损性曲线,并与已有经验性易损性曲线进行了对比验证。Nguyen 等^[33]等利用精细化等效静力分析方法对浅埋矩形隧道展开了地震易损性分析。

尽管该方法应用较多,但也存在一定的限制,如下所述:①当将一维场地反应得到的水平向位移施加到二维模型边界时,不同的模型宽度对最终结果

影响显著。若模型宽度较大,则该水平位移对土-地下结构体系响应影响不大;若模型宽度较小,则将对土-结构接触影响过大,上述 2 种情况都会使得计算结果不准确。②在二维土-地下结构数值模型中,若土-结构接触采用弹簧模拟,选用合理的弹簧刚度系数是一个关键问题,目前尚无广泛接受的计算公式。

2.3.3 非线性动力分析方法

随着计算机技术的发展,相关研究已不再受大规模计算的困扰,利用非线性动力分析方法进行地下结构地震易损性分析已经成为了主流。该方法主要有以下几个优势:①在模型建立及输入参数正确的条件下,非线性动力分析方法的计算结果的准确性较高;②能够合理考虑土体和结构非线性、土-结构接触现象、模型几何非线性现象以及边界非线性等特性;③能够考虑地震动输入不确定性、土体材料参数不确定性以及结构材料参数不确定性影响等因素;④能够合理选择模型分析大小以及维度,可以考虑土体以及结构阻尼影响、地震动输入方式、不同黏性边界定义等等。由于以上优势,该方法是目前最为推荐的地下结构易损性分析方法。近 5 年来,各国学者利用该方法对地下结构地震易损性分析展开了大量的研究,采用非线性动力分析法分别针对大型地下洞室^[34]、岩石隧道^[39-46]、软土浅埋圆形隧道^[35-38]、隧道竖井^[54]、地下车站^[50-52]、无支护铁路隧道^[49]、地下车库-上部结构相互作用体系^[56]、地下综合管廊^[53]、地下核电站取水结构^[57]等不同类型地下结构建立了相应地震易损性曲线。

根据以上讨论可知,基于非线性动力分析的地震易损性分析方法具有较多优势,其计算结果较为可靠。但是,该方法的数值计算结果可靠度也取决于地震动输入的合理性。地震动的合理选择需要满足以下几个条件:①选取足够数量的地震动记录进行计算,使得计算结果的离散程度最小;②选择的地震动记录能够反映地下结构所处场地特征,一般可采用当地地区设计反应谱进行选波;③选择的地震动记录能够体现震级和震中距的不确定性。值得注意的是,采用的地震动记录越多,相应数值计算结果的离散型就越小,易损性分析的精度越高,但同时计算量大大增加。因此,有必要选择合理的地震动记录数量,使其兼顾计算效率和准确性。

2.4 基于实验数据的地震易损性分析

在地下结构领域,基于实验数据的易损性分析的相关研究较少,而在建筑工程及桥梁工程中相对应用较多。Kiani 等^[58]采用离心机试验方法,针对砂

土圆形隧道,研究了地震荷载下隧道结构不同失效模式,以PGD为地震动强度参数,建立了相应的地震易损性曲线,并与NIBS^[21]中基于专家判断法的地震易损性曲线进行了对比分析。基于实验数据的地震易损性分析对于认识地下结构的破坏机理及定义不同破坏状态等方面具有积极意义,但是其分析结果局限于实验数据量和实验工况次数。同时,地下结构试验相对简单,难以模拟实际情况,考虑到实验成本等原因,难以获得大量数据样本。

2.5 基于混合分析法的地震易损性分析

上述基于专家判断、历史震害调查、数值方法以及实验数据的地震易损性分析得到了较为广泛的应用,但是这些方法都存在一定的不足。基于此,相关学者提出了基于混合分析法的地震易损性分析,即采用上述4种分析方法中任意2种或多种方法展开地震易损性分析。目前,基于混合分析法的地震易

损性分析主要利用结构的震害统计数据,对基于数值法或专家调查法的易损性曲线进行修正。该方法在建筑工程^[59-60]和桥梁工程^[59-61]领域已经有所应用,但是在地下结构领域,该方法的应用目前尚属空白。基于混合分析法的地震易损性分析可以将专家判断、历史震害数据、有限元计算结果或相关试验结果信息有机地利用起来,减少了专家判断带来的主观性影响,避免了数值分析中的大规模计算及大量不确定性,同时分析结果更为可靠。

地下结构地震易损性分析方法不断发展,且在近5年相关研究层出不穷。国内外学者根据不同的方法建立了相应的地下结构地震易损性曲线,为后续的地下结构定量地震风险分析奠定基础。综上所述,地下结构地震易损性分析发展历程如图4所示。

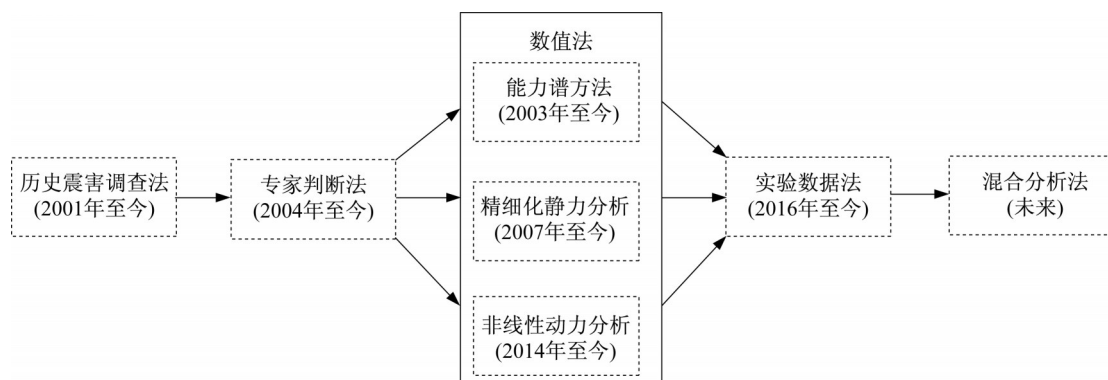


图4 地下结构地震易损性分析发展历程

Fig.4 The development trend of seismic fragility analysis of underground structure

3 存在的问题及展望

通过以上国内外地下结构地震易损性分析研究的总结,可知现有研究存在一些不足之处,未来可以展开深入研究,具体可以归纳为以下几方面:

(1)地下结构破坏指标的选择。地下结构破坏指标 W 的选取是地震易损性分析的关键。不同的结构性能指标将引起分析结果上的差异,以地下车站地震响应为例,研究^[50]表明,车站最大层间位移角与最大中柱轴压比并不同时出现,即车站变形最大时不一定破坏最严重,这表明变形指标并不能完整描述结构真实破坏情况,也体现了单一破坏准则无法较准确地反映最终结构的破坏状态。目前,在建筑工程及桥梁工程领域,已有相关学者提出了基于多维性能极限状态的结构易损性分析方法,即选用

多个结构地震破坏指标展开易损性分析。将传统基于单一破坏指标 W 拓展至基于多维破坏指标的易损性分析,得到的结构抗震性能结果更为可靠,未来在地下结构领域可以进一步展开分析。

(2)地震动强度参数的选择。在地震易损性分析中,与结构地震需求参数密切相关的地震动强度参数 E ,能显著降低结构地震需求结果的离散性。目前,地下结构地震易损性分析通常选用地表峰值加速度PGA或地表峰值速度PGV作为地震动强度参数 E ,但未给出选用这些参数的具体原因,缺少严谨的讨论和验证,这些地震动强度参数未必是最优 E 。选择合理的地震动参数是地震易损性分析的关键因素之一,因此,该方向未来可展开更多研究。另一方面,目前地下结构地震易损性分析仅采用单一的地震动强度参数 E ,但由于地震动的幅值、频谱及

强震持时等特性均会对结构的破坏产生影响,单一地震动强度参数 E 很难对其强度特性进行全面体现。因此,在地下结构地震易损性分析中,可以考虑使用2个或多个地震动强度参数 E_s 组成多维地震动强度参数来更合理地描述地震动强度特性,从而获得更合理的地震易损性评估结果,未来可以展开更多研究。

(3)劣化条件下地下结构时变地震易损性分析。随着地下结构服役时间增加和周围环境介质的影响,氯离子和硫酸盐侵蚀、混凝土碳化及杂散电流等因素会使得地下结构发生一定程度的材料劣化。材料劣化会使得地下结构抗震性能减弱,难以保障其在设计使用寿命周期内的预期抗震性能目标。目前,国内外学者针对材料劣化条件下的建筑及桥梁结构展开了大量地震易损性分析研究,但针对地下结构的相关研究较少^[35-36],亟需深入展开材料劣化条件下的地下结构时变地震易损性分析。

(4)地表结构与地下结构相互作用影响。地下结构尺寸向大型化发展的同时,与周边建筑物的距离越来越近,相互作用效应不容忽视。因此,在城市复杂环境中,地震来临时地下结构与周边建筑物相互作用是一个重要因素,目前既有地下结构地震易损性分析未考虑周边建筑物的影响,该领域尚属空白,未来可以展开考虑地表结构影响的地下结构地震易损性分析。

(5)特殊场地地下结构地震易损性分析。由于工程实践的需要,地下结构难以避免地被建造在较为特殊的场地,如跨断层、近断层、液化场地等。目前,特殊场地中地下结构的地震易损性分析尚属空白。受到特殊场地条件的影响,对这类地下结构进行地震易损性分析时,传统的分析方法面临一定的难度甚至不再适用。比如,对于液化场地中的地下结构,由于高地震荷载下土层砂土区域可能发生土体液化现象,最终会影响地下结构地震易损性评估结果,进一步研究可以采用能够考虑土体液化影响的水土耦合动力有限元方法展开分析;对于跨断层或近断层的地下结构,需要考虑地震荷载和断层错动影响,可以建立基于多尺度理念的三维弹塑性动力有限元模型展开进一步研究。

(6)超长线状地下结构纵向地震易损性分析。目前,地下结构地震易损性研究一般选取结构典型横截面展开二维有限元分析,没有考虑地下结构如地铁隧道纵向地震响应的影响。地铁隧道作为典型

超长线状结构,势必会穿越不同的地层,该问题涉及的地震荷载行波效应和场地不均匀性均会对隧道地震响应及进一步的结构易损性产生影响,目前该方向值得开展更多探索研究。比如,针对长大盾构隧道,进一步研究可以建立大尺度三维土体-超长盾构隧道系统动力有限元模型,考虑地震动空间效应的影响,揭示一致激励与非一致激励下地下结构的响应机理及地震易损性发展规律。

4 结论

强震作用下地下结构可能产生严重震害以及次生灾害,而且,地下结构一旦受损,修复难度极大,将给人们的生命及财产带来不可估量的损失。为了减轻地震灾害引发的潜在威胁,亟需对既有地下结构展开全面的抗震性能分析。地震易损性分析能从概率的角度量化地下结构抗震性能,揭示地下结构薄弱构件及倒塌失效路径。相关研究对震前地下结构健康监测、抗震加固、风险评估等研究以及震后顺利开展抢险救援工作、降低地震导致的社会经济损失具有极其重要的意义。

因此,为了促进国内地下结构地震易损性分析的发展和应用,本文详细介绍了地下结构地震易损性分析国内外最新研究概况,分析了破坏指标及地震动强度参数的选取以及不确定性因素的影响,归纳了常用的地下结构易损性曲线建立方法。目前,依据不同来源的分析数据,地下结构地震易损性分析主要可分为以下5种:①基于专家判断的地震易损性分析;②基于历史震害调查的经验地震易损性分析;③基于数值方法的地震易损性分析;④基于实验数据的地震易损性分析;⑤混合地震易损性分析。以上5种地震易损性分析方法各有优缺点,针对具体问题应合理选用上述几种易损性分析方法,同时需要兼顾巨大计算量和要求的分析精度。对于不同的易损性分析方法,合理的地下结构破坏指标 W 以及地震动强度参数 E 直接决定了计算量大小以及分析精度。

目前,相比建筑和桥梁工程领域,国内地下结构地震易损性分析研究还处于较早阶段,远远未成熟。随着地下空间的不断开发和投入使用,地表极端荷载、地震、氯离子腐蚀以及渗流侵蚀等众多不利环境因素愈为复杂,因此,亟需深入展开相关地下结构地震易损性研究,建立起科学有效的地下结构全寿命

周期地震易损性分析理论和方法。

作者贡献申明:

黄忠凯:撰写了初稿,完成了后续修改。

张冬梅:制订了研究大纲和研究内容,对论文提出了建设性意见和建议。

参考文献:

- [1] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, *et al.* Damage to Daikai subway station [J]. *Soils and foundations*, 1996, 36 (Special): 283.
- [2] HUO H B. Seismic design and analysis of rectangular underground structures [D]. West Lafayette: Purdue University, 2005.
- [3] 杜修力,王刚,路德春.日本阪神地震中大开地铁车站地震破坏机理分析[J].*防灾减灾工程学报*,2016,36(2):165.
DU Xiuli, WANG Gang, LU Dechun. Earthquake damage mechanism analysis of Dakai metro station by Kobe Earthquake [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(2): 165.
- [4] 杜修力,马超,路德春,等.大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析[J].*土木工程学报*,2017,50(1):53.
DU Xiuli, MA Chao, LU Dechun, *et al.* Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Daikai subway station under seismic loads[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(1): 53.
- [5] 马超.地铁车站结构地震塌毁过程模拟及破坏机理分析[D].北京:北京工业大学,2017.
MA Chao. Collapse procedure simulation and failure mechanism analysis on subway stations under seismic loads [D]. Beijing:Beijing University of Technology, 2017.
- [6] DEIERLEIN G, KRAWINKLER H, CORNELL C. A framework for performance-based earthquake engineering [C]//*Proceedings of the 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering*. Christchurch:Elsevier, 2003: 1-8.
- [7] PORTER K A. An overview of PEER's performance-based earthquake engineering methodology [C]//*Proceedings of the Ninth International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP9)*. San Francisco: S.n.], 2003: 1-8.
- [8] LU D, YU X, JIA M, *et al.* Seismic risk assessment for a reinforced concrete frame designed according to Chinese codes [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2013, 10(10): 1295.
- [9] TAVARES D, SUESCUN J, PAULTRE P, *et al.* Seismic fragility of a highway bridge in Quebec [J]. *Journal of Bridge Engineering*,2013, 18(11): 1131.
- [10] 于晓辉,李雁军,吕大刚,等.基于易损性的RC框架填充墙结构概率地震安全评估[J].*土木工程学报*,2014,47 (S2): 260.
- [11] YU Xiaohui, LI Yanjun, LU Dagang, *et al.* Fragility-based probabilistic seismic safty assessment of RC frame structures with infilled masonry walls[J].*China Civil Engineering Journal*, 2014,47 (S2) : 260.
- [12] OWEN G N, SCHOLL R E. Earthquake engineering of large underground structures [R]. [s. l.]: Federal Highway Administration, 1981.
- [12] 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.
DU Xiuli, LI Yang, XU Chengshun, *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.
- [13] SOLAK T. Seismic assessment results and actual application in the complex ground conditions of Bolu tunnels after the 1999 Duzce earthquake [M]. *Underground Space Use. Analysis of the Past and Lessons for the Future, Two Volume Set.* [s.l.]: CRC Press, 2005.
- [14] KONTOE S, ZDRAVKOVIC L, POTTS D M, *et al.* Case study on seismic tunnel response [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(12): 1743.
- [15] WANG W L, WANG T T, SU J J, *et al.* Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(3): 133.
- [16] HWANG J H, LU C. C. Seismic capacity assessment of old Sanyi railway tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, 22(4): 433.
- [17] LU C C, HWANG J H. Damage analysis of the new Sanyi railway tunnel in the 1999 Chi-Chi earthquake: necessity of second lining reinforcement [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 73: 48.
- [18] 王峥嵘,张哲,高波,等.山岭隧道洞口震害因素分析与抗震风险模糊综合评价[J].*中南大学学报(自然科学版)*,2012,43(3):1122.
WANG Zhengzheng, ZHANG Zhe, GAO Bo, *et al.*, Factors of damage and fuzzy synthetic evaluation on seismic risk of mountain tunnel portals[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*,2012,43(3): 1122.
- [19] SHEN Y, GAO B, YANG X, *et al.* Seismic damage mechanism and dynamic deformation characteristic analysis of mountain tunnel after Wenchuan earthquake [J]. *Engineering Geology*, 2014, 180: 85.
- [20] YU H, CHEN J, BOBET A, *et al.* Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 54: 102.
- [21] National Institute of Building Science (NIBS). HAZUS-MH: Technical Manuals[M]. Washington D C: National Institute of Building Science, 2004.

- [22] DOWDING C H, ROZAN A. Damage to rock tunnels from earthquake shaking [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1978, 104(2): 175.
- [23] American Lifelines Alliance (ALA). Seismic fragility formulations for water systems, Part1-Guideline [M]. Reston: ASCE-FEMA, 2001.
- [24] CORIGLIANO M, LAI C G, BARLA G. Seismic vulnerability of rock tunnels using fragility curves [C]// *Proceedings of 11th ISRM Congress*. [s.l.]: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007:1-8.
- [25] 范刚, 马洪生, 张建经. 汶川地震隧道概率易损性模型研究 [J]. *铁道建筑*, 2012, 10: 40.
FAN Gang, MA Hongsheng, ZHANG Jianjing. Study on probability model of vulnerability for tunnels in Wenchuan earthquake [J]. *Railway Engineering*, 2012, 10: 40.
- [26] 赵晓勇, 杨其新, 范刚. 隧道震损快速分析方法研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 2015, 35(4): 164.
ZHAO Xiaoyong, YANG Qixin, FAN Gang. The research on seismic damage rapid assessment of tunnel [J]. *Earthquake Engineering & Engineering Dynamics*, 2015, 35(4): 164.
- [27] SALMON M, WANG J, JONES D, *et al.* Fragility formulations for the BART system [C]// *Proceedings of Sixth U. S. Conference and Workshop on Lifeline Earthquake Engineering (TCLEE)*. [s.l.]: American Society of Civil Engineers, 2003:1-10.
- [28] ARGYROUDIS S, PITILAKIS K, BOUSSOULAS N, *et al.* Vulnerability assessment of shallow metro tunnels in Greece [C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Geotechnical Earthquake Engineering*. Athens: [S.n.], 2007: 25-28.
- [29] ARGYROUDIS S A, PITILAKIS K D. Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 35: 1.
- [30] LE T S, HUH J, PARK J H. Earthquake fragility assessment of the underground tunnel using an efficient SSI analysis approach [J]. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2014, 2(12): 1073.
- [31] HUH J, TRAN Q, HALDAR A, *et al.* Seismic vulnerability assessment of a shallow two-story underground RC box structure [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(7): 735.
- [32] AVANAKI M J, HOSEINI A, VAHDANI S, *et al.* Seismic fragility curves for vulnerability assessment of steel fiber reinforced concrete segmental tunnel linings [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78: 259.
- [33] 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.
- [34] 崔臻, 盛谦, 冷先伦, 等. 基于增量动力分析的大型地下洞室群性能化地震动力稳定性分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(4): 703.
CUI Zhen, SHENG Qian, LENG Xianlun, *et al.* Performance-based seismic stability assessment of large underground cavern group with incremental dynamic analysis [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(4): 703.
- [35] ARGYROUDIS S, TSINIDIS G, GATTI F, *et al.* Seismic fragility curves of shallow tunnels considering SSI and aging effects [C]// *Proceedings of the 2nd Eastern European Tunnelling Conference: Tunnelling in a Challenging Environment*. Athens: [S.n.], 2014: 1-10.
- [36] ARGYROUDIS S, TSINIDIS G, GATTI F, *et al.* Effects of SSI and lining corrosion on the seismic vulnerability of shallow circular tunnels [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 98: 244.
- [37] 周志光, 任永强. 地震作用下软土隧道的易损性分析 [J]. *结构工程师*, 2018, 34(S1): 122.
ZHOU Zhiguang, REN Yongqiang. Seismic fragility analysis of tunnels in soft soils [J]. *Structural Engineers*, 2018, 34(S1): 122.
- [38] HUANG Z K, PITILAKIS K, TSINIDIS G, *et al.* Seismic vulnerability of circular tunnels in soft soil deposits: The case of Shanghai metropolitan system [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 98: 103341.
- [39] OSMI S K C, AHMAD S M, ADNAN A. Seismic fragility analysis of underground tunnel buried in rock [C]// *Proceedings of the International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. [s.l.]: Springer, 2015:1-9.
- [40] OSMI S K C, AHMAD S M. Seismic fragility curves for shallow circular tunnels under different soil conditions [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 2016, 10(10): 1351.
- [41] HUANG G, QIU W, ZHANG J. Modelling seismic fragility of a rock mountain tunnel based on support vector machine [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 102: 160.
- [42] 刘立荣, 王海彦, 黄歆. 考虑不确定因素的山岭隧道地震易损性研究 [J]. *世界地震工程*, 2018, 34(1): 173.
LIU Lirong, WANG Haiyan, HUANG Guang. Study on vulnerability analysis of rock mountain tunnel considering uncertainties [J]. *World Earthquake Engineering*, 2018, 34(1): 173.
- [43] 丁祖德, 资昊, 计霞飞, 等. 考虑衬砌劣化的山岭隧道地震易损性分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(3): 9.
DING Zude, ZI Hao, JI Xiafei, *et al.* Seismic fragility analysis of mountain tunnels considering lining degradation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(3): 9.
- [44] ANDREOTTI G, LAI C G. Use of fragility curves to assess the seismic vulnerability in the risk analysis of mountain tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 91: 103008.
- [45] 王伯超, 王鑫, 杨柳君, 等. 基于IDA分析法的公路隧道衬砌抗震性能分析 [J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(5): 1.
WANG Bochao, WANG Xin, YANG Lijun, *et al.*, Seismic

- performance analysis of highway tunnel lining based on IDA [J]. *Railway Standard Design*, 2020, 64(5):1.
- [46] SARKAR R, PAREEK K. Influence of stratification and assessment of fragility curves for mountain tunnels [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2020: 1.
- [47] 刘国庆, 肖明, 陈俊涛. 基于增量动力分析的隧洞结构抗震性能分析[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(3):1.
LIU Guoqing, XIAO Ming, CHEN Juntao. Seismic performance assessment of tunnel structure based on incremental dynamic analysis [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(3):1.
- [48] QIU W, HUANG G, ZHOU H, *et al.* Seismic vulnerability analysis of rock mountain tunnel [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(3): 04018002.
- [49] MOAYEDIFAR A, NEJATI H R, GOSHTASBI K, *et al.* Seismic fragility and risk assessment of an unsupported tunnel using incremental dynamic analysis (IDA) [J]. *Earthquakes and Structures*, 2019, 16(6): 705.
- [50] LIU T, CHEN Z, YUAN Y, *et al.* Fragility analysis of a subway station structure by incremental dynamic analysis [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2017, 20(7): 1111.
- [51] 钟紫蓝, 申轶尧, 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.
ZHONG Zilan, SHEN Yiyao, HAO Yaru, *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.
- [52] 钟紫蓝, 申轶尧, 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.
ZHONG Zilan, SHEN Yiyao, ZHEN Libin, *et al.*, Ground motion intensity measures and dynamic response indexes of metro station structures [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(3):486.
- [53] 张景威, 周晶. 地下综合管廊结构的易损性分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(3): 48.
ZHANG Jingwei, ZHOU Jin, Vulnerability analysis of underground utility tunnel [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(3): 48.
- [54] MAYORAL J M, ARGYROUDIS S, CASTAÑON E. Vulnerability of floating tunnel shafts for increasing earthquake loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 80: 1.
- [55] HE Z, CHEN Q. Vertical seismic effect on the seismic fragility of large-space underground structures [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 78: 31.
- [56] 朱纹军. 土-地下车库-上部结构相互作用体系地震易损性研究[J]. *建筑结构*, 2017, 47(S1):546.
ZHU Wenjun. Seismic vulnerability analysis of soil-underground garage superstructure considering soil-structure interaction [J]. *Building Structure*, 2017, 47(S1):546.
- [57] 张铁群. 基于OpenSees的核电站取水结构地震反应与易损性分析[D]. 浙江:浙江大学, 2015.
ZHANG Yiqun. Seismic performance and fragility analyses of water intake structure in nuclear power station based on OpenSees[D]. Zhe jiang: Zhejiang University, 2015.
- [58] KIANI M, GHALANDARZADEH A, AKHLAGHI T, *et al.* Experimental evaluation of vulnerability for urban segmental tunnels subjected to normal surface faulting [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 89: 28.
- [59] BIVINS W S. Seismic vulnerability and impact of disruptions of lifelines in the conterminous United States [R]. Redwood City: Applied Technology Council, 1992.
- [60] Comartin C. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings [R]. Redwood City: Applied Technology Council, 1996.
- [61] BARBAT A H, EERI M, MOYA F Y, *et al.* Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones [J]. *Earthquake spectra*, 1996, 12(3) : 371.
- [62] KAPPOS A J, PANAGOPOULOS G, PANAGIOTOPOULOS C, *et al.* A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2006, 4(4): 391.
- [63] GELAGOTI F, KOURKOULIS R, ANASTASOPOULOS I, *et al.* Rocking isolation of low-rise frame structures founded on isolated footings [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(7): 1177.
- [64] 陆新征, 施炜, 张万开, 等. 三维地震动输入对IDA倒塌易损性分析的影响[J]. *工程抗震与加固改造*, 2011, 33(6): 1.
LU Xinzhen, SHI Wei, ZHANG Wankai, *et al.* Influence of three-dimensional ground motion input on IDA-based collapse fragility analysis [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2011, 33(6): 1.
- [65] 于晓辉. 钢筋混凝土框架结构的概率地震易损性与风险分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
YU Xiaohui. Probabilistic Seismic Fragility and Risk Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [66] ADHIKARI R, GAUTAM D. Component level seismic fragility functions and damage probability matrices for Nepali school buildings [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 120, 316.
- [67] CHOI E, DESROCHES R, NIELSON B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(2): 187.
- [68] MOSCHONAS I F, KAPPOS A J, PANETSOS P, *et al.* Seismic fragility curves for Greek bridges: methodology and case studies [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2009, 7(2): 439.
- [69] RAMANATHAN K, PADGETT J E, DESROCHES R. Temporal evolution of seismic fragility curves for concrete box-girder bridges in California [J]. *Engineering Structures*, 2015, 97: 29.