

DOI: 10.11779/CJGE20230397

# 基于 IDA 方法的综合管廊纵向地震易损性分析研究

李锦强, 钟紫蓝\*, 申家旭, 张 卜, 张亚波, 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:** 为了提出一种基于非线性增量动力分析 (incremental dynamic analysis, IDA) 的长线型综合管廊纵向地震性能评价的易损性分析方法, 以单舱综合管廊为研究对象建立了简化梁-弹簧模型, 合理地考虑了管廊接口的力学性能和管廊-土相互作用, 将筛选的 17 组地震动统一调幅至不同强度水平后作为输入开展一维自由场分析以获取管廊底板位置处的地震动时程, 最后开展了考虑地震动行波效应的综合管廊地震响应分析。基于 IDA 分析结果对地震动强度指标进行优选, 最终建立了以管廊底板位置处峰值速度和地表峰值速度为地震动强度指标, 以管廊接口张开量为损伤指标的易损性曲线, 得到了不同地震烈度水平下综合管廊的失效概率。给出的典型 II 类场地中管廊地震易损性曲线和失效概率可以作为评价该类地下结构抗震性能的有效工具, 为长线型综合管廊在不同地震动强度下的损伤预测提供可靠依据。

**关键词:** 综合管廊; 梁-弹簧模型; 增量动力分析; 易损性分析; 失效概率

中图分类号: TU435; TU990.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)08-1622-10

作者简介: 李锦强 (1995—), 男, 博士研究生, 主要从事地下结构抗震方面的研究工作。E-mail: lijinqiangs@163.com。

## Longitudinal seismic fragility analysis of utility tunnel structures based on IDA method

LI Jinqiang, ZHONG Zilan, SHEN Jiaxu, ZHANG Bu, ZHANG Yabo, DU Xiuli

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

**Abstract:** This study aims to propose a fragility analysis method for evaluating the longitudinal seismic performance of long-line utility tunnels based on nonlinear incremental dynamic analysis (IDA). To this end, a simplified beam-spring model is established, to reasonably consider the mechanical properties of the joint and the soil-tunnel interaction. A series of 17 sets of ground motion records are selected and uniformly scaled to different intensity levels as the input of one-dimension free field analyses to obtain the ground motions at the bottom slab of a utility tunnel. Finally, the seismic analysis of the utility tunnel considering wave passage effects is conducted. Based on the IDA results, the optimal intensity measure is selected. With the damage measure of the peak joint opening, the fragility curves of the utility tunnel are established using the peak velocity at the bottom slab of the tunnel and the peak velocity at the ground surface as the intensity measures, respectively. The failure probability of the utility tunnel under different earthquake intensity levels is also obtained. The proposed fragility curves and failure probability of the utility tunnel in typical site II can provide an effective tool to estimate the seismic performance of this type of underground structures and a reliable basis for predicting damage under different earthquake intensity levels.

**Key words:** utility tunnel; beam-spring model; incremental dynamic analysis; fragility analysis; failure probability

## 0 引言

综合管廊是在城市地下建造一个连续构筑物, 将电力、通讯、给排水等生命线工程设施共同敷设于其中的公共基础设施。综合管廊的优势在于方便管线后期的运营和维护, 有效延长了管线的使用寿命, 同时可以解决城市中“蜘蛛网”“拉链公路”等问题, 是保障城市可持续发展的重要地下生命线工程<sup>[1]</sup>。为了确保施工的便利性和安全性, 综合管廊通常会间隔距离设置接口。地震动在传播过程中的空间非一致性不可

避免地导致管廊发生拉压和弯曲变形, 从而导致管廊接口发生张开或错动, 接口的破坏轻则导致漏水, 重则对廊内敷设的重要生命线工程造成破坏, 进而威胁到人民生命财产安全。因此, 综合管廊纵向地震响应分析尤为值得关注。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52378470; 51978020); 中国博士后科学基金项目 (2021M700311); 国家重点研发计划项目 (2022YFC3003603)

收稿日期: 2023-05-08

\*通信作者 (zilanzhong@bjut.edu.cn)

近年来, 国内外诸多学者针对综合管廊地震响应规律开展了一系列研究, 旨在探究综合管廊结构在地震中的响应规律。Chen 等<sup>[2]</sup>开展了考虑非一致激励的综合管廊缩尺振动台试验, 发现管-土相互作用相对位移主要以土体变形为主要控制作用, 管廊接口张开量主要集中在其中一个接口位置处。梁建文等<sup>[3]</sup>基于壳-弹簧模型对管廊-土相互作用进行建模, 并采用反应位移法分析了双舱综合管廊在地震波作用下的内力和变形, 发现壳-弹簧模型可以很好地模拟管廊接头的力学性能以及地震作用下结构的真实变形及内力分布, 适用于管廊的纵向响应分析。Tang 等<sup>[4]</sup>将综合管廊简化为梁-弹簧模型, 研究了近远场地震作用下非均匀场地中长线型综合管廊的地震响应规律, 发现近场地震动相对于远场地震动具有更强的破坏性。以上研究工作表明, 综合管廊在地震响应下的破坏主要以接口破坏为主。然而, 这些研究仅考虑了特定地震动强度和频谱特征下结构的动力响应, 不能充分反映地震动的随机性, 无法对综合管廊的性能特征进行有效评估。

增量动力分析 (incremental dynamic analysis, IDA) 是一种结构地震易损性评价方法, 通过对若干条具有代表性的地震动缩放至不同的地震强度等级, 将缩放后的地震动作为输入开展结构的非线性动力分析并建立易损性曲线, 可以有效地反映结构随着地震动强度的增加从线弹性阶段到最后破坏的全过程。IDA 方法是基于性能的地震工程理论框架中的重要组成部分, 近年来在地下结构抗震性能评估中日益普及。钟紫蓝等<sup>[5]</sup>、Zhong 等<sup>[6]</sup>以地铁车站为研究对象, 通过静力推覆分析对地铁车站在不同极限状态下的损伤限值进行定义, 对不同深度处的地震动参数进行指标优选, 建立了地铁车站的地震易损性曲线。Zhong 等<sup>[7]</sup>和 Li 等<sup>[8]</sup>分别建立了以峰值加速度 (peak ground acceleration, PGA)、峰值速度 (peak ground velocity, PGV) 为地震动强度指标 (intensity measure, IM), 以接口张开量为结构损伤指标 (damage measure, DM) 的易损性曲线。禹海涛等<sup>[9]</sup>提出了基于 IDA 分析的沉管隧道纵向地震易损性分析方法, 研究了管节长度、地震动输入方向等因素对沉管隧道的影响。Long 等<sup>[10]</sup>开展了一致激励和非一致激励地震作用下盾构隧道的易损性分析, 研究发现非一致激励作用下盾构隧道的破坏概率大于一致激励。目前, 针对埋地管道、盾构隧道、沉管隧道等长线型地下结构的易损性研究已有开展, 通过获取的易损性曲线可以很好地对不同地震强度下结构性能进行评价。综合管廊作为长线型地下结构, 在强震作用下, 地震破坏力主要集中在接口位

置, 也决定了结构的损伤状态。因此, 建立以管廊接口张开量为损伤指标的综合管廊地震易损性评价是有必要的。

鉴于此, 本文将基于 IDA 分析的结构易损性评价方法进一步拓展至长线型综合管廊抗震性能评价中, 以最大接口张开量作为结构的损伤指标, 建立结构损伤等级与结构抗震性能状态的关系, 对场地不同埋深位置的地震动强度指标进行优选, 建立了 II 类场地中长线型综合管廊地震易损性曲线, 并定量地给出了管廊在不同抗震设防等级下的破坏概率, 为长线型综合管廊在不同地震动强度作用下的损伤预测提供了依据。

## 1 综合管廊纵向地震易损性分析流程

本文提出的基于 IDA 分析方法的综合管廊纵向地震易损性分析流程如图 1 所示, 该方法考虑了地震动的不确定性、不同土层土体非线性以及综合管廊埋深等影响结构响应的重要参数, 主要包括以下 7 个关键步骤。

(1) 确定综合管廊结构的材料属性、尺寸及管廊埋深等参数, 分析结构所在位置场地信息, 选取合适的露头基岩地震动记录并进行多次调幅。

(2) 将步骤 (1) 中选取的地震动经调幅处理后折半输入到基岩作为基岩位置输入, 通过对场地开展一维场地等效线性化分析确定土体等效剪切模量和土体等效阻尼比, 进一步计算土体等效弹性模量和土体 Rayleigh 阻尼系数。

(3) 建立一维自由场模型, 采用步骤 (2) 获取的土体等效弹性模量和土体 Rayleigh 阻尼系数等参数定义土体的非线性, 将调幅处理后地震动折半后输入到基岩, 开展一维自由场响应分析, 提取综合管廊底板处地震动时程曲线。

(4) 建立二维梁-弹簧模型, 接口简化为三向接口弹簧, 管廊-土相互作用简化为双向土弹簧, 将步骤

(3) 提取的地震动经延时处理后输入到土弹簧远端节点位置处。

(5) 选取综合管廊接口张开量最大值定义结构的不同损伤状态。

(6) 通过对不同地震动强度参数和结构损伤参数 (最大接口张开量) 进行回归分析, 确定最适合的地震动强度指标。

(7) 绘制综合管廊在不同损伤状态下的地震易损性曲线。

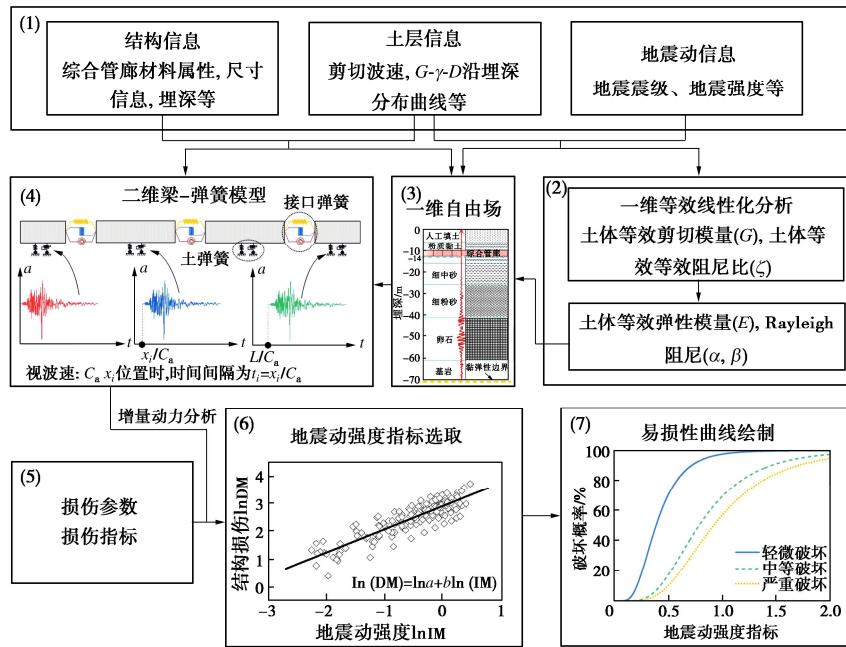


图 1 综合管廊纵向地震易损性分析流程图

Fig. 1 Procedures of longitudinal seismic fragility analysis for utility tunnel

## 2 长线型综合管廊易损性分析模型

### 2.1 长线型综合管廊模型建立

选取北京市典型场地, 根据工程地质勘测报告可知综合管廊工程建造区域由上及下依次为人工填土、粉质黏土、细中砂、细粉砂、卵石和基岩 6 个主要土层, 各土层物理参数信息详见表 1, 土体等效剪切波速计算为 230 m/s, 根据《城市轨道交通结构抗震设计规范》<sup>[11]</sup>划分为 II 类场地。综合管廊宽 4.8 m, 高 4.0 m, 壁厚 0.4 m, 管廊顶板距地表约 10.0 m, 场地土层信息、综合管廊纵向及横向示意图如图 2 所示。

表 1 土层物理参数表

Table 1 Geotechnical properties of soil layers

土层	土质	土层厚度 H/m	密度 $\rho$ /(kg·m <sup>-3</sup> )	剪切波速 v <sub>s</sub> /(m·s <sup>-1</sup> )
1	人工填土	6.0	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

采用 OpenSees 有限元软件进行建模分析<sup>[12]</sup>, 由于管廊管体刚度远大于管廊接口刚度, 地震作用时管廊接口处的变形和转角远大于管廊本身, 因此可以将管廊管体简化为纤维梁, 管廊接口简化为三向接口弹簧, 管廊-土相互作用简化为双向土弹簧, 图 3 为综合管廊梁-弹簧模型示意图。根据规范<sup>[13]</sup>, 综合管廊节段长度  $l$  取值为 30.0 m, 通过对综合管廊总长度开展收敛性分析, 将本研究中管廊总长度定为 720 m,

对应的管廊节段数为 24 段。综合管廊为典型的钢筋混凝土结构, 在 OpenSees 中基于纤维梁柱单元模拟, 采用考虑抗拉强度的 Kent-Scott-Park 本构模型模拟混凝土<sup>[14]</sup>, 钢筋采用单轴二折线本构模型<sup>[15]</sup>, 材料本构关系如图 3 (b) 所示, 力学参数如表 2 所示。图 3 (c) 为综合管廊接口详图, 接口在强震作用下可能发生轴向拉压破坏、横向剪切破坏以及弯曲变形破坏。已有相关学者通过试验、三维数值模拟等方式对综合管廊接口力学性能进行了研究<sup>[16]</sup>, 梁建文等<sup>[3]</sup>提出了综合管廊接口力学模型并将其应用于长线型综合管廊地震响应分析中, 胡正一<sup>[17]</sup>基于已有学者对于盾构隧道、沉管隧道的研究基础, 提出了综合管廊接口力学性能理论公式。依据已有学者研究结果<sup>[3, 17]</sup>, 在简化模型的接口处设置 3 个方向的非线性弹簧, 如图 3 (d) 所示, 以此反映相邻管廊节段之间的抗拉、抗压、抗剪及抗弯特征。

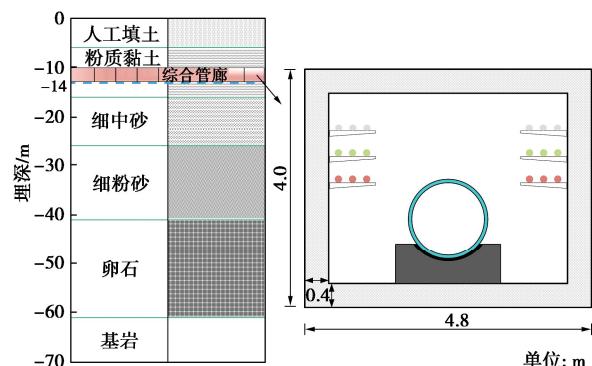


图 2 场地信息及综合管廊结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of site information and utility tunnel

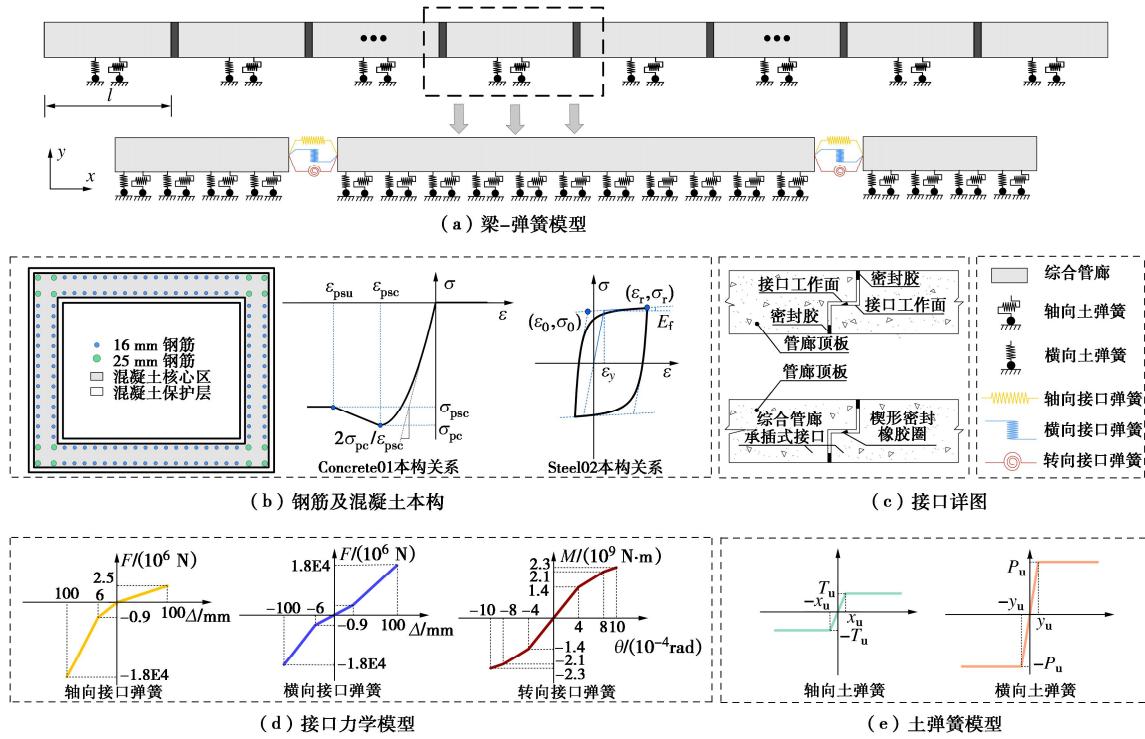


图 3 综合管廊-土体相互作用数值模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of utility tunnel-soil interaction model

表 2 钢筋及混凝土材料参数

Table 2 Material parameters of steel rebars and concrete

材料	密度 $\gamma_u/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E_u/\text{GPa}$	屈服强度 $f_y/\text{MPa}$	硬化系数	轴心抗压 强度 $f_{c0}/\text{MPa}$	轴心抗拉 强度 $f_t/\text{MPa}$	峰值压应变 $\varepsilon_{c0}$	极限压应变 $\varepsilon_{cu}$
钢筋	7850	200	426	0.001	—	—	—	—
混凝土	2500	32.5	—	—	19.1	2.39	0.0020	0.0038

根据规范<sup>[11]</sup>, 管廊地基弹簧刚度计算公式为

$$k_t = K_b T W, \quad (1)$$

$$k_l = 1/3k_t. \quad (2)$$

式中:  $k_t$  为沿地下结构纵向侧壁拉压地基弹簧刚度;  $k_l$  为沿地下结构纵向侧壁剪切地基弹簧刚度;  $K_b$  为基床系数, 根据规范<sup>[18]</sup>取值为 20 MPa/m;  $T$  为地基的集中弹簧间距, 本文取 3.0 m;  $W$  为管廊横向宽度。综合管廊与土体发生相互作用, 在横向土对周围土体产生压力导致土体发生变形, 在轴向上管廊与土体间切向力超过管土峰值摩擦力后会产生相对滑移, 根据规范<sup>[19]</sup>, 土体轴向和横向的屈服位移分别设置为 10.0, 420.0 mm。表 3 为土弹簧关键参数取值, 地基弹簧轴向及横向力-位移关系曲线如图 3 (e) 所示。

表 3 轴向和横向土弹簧参数

Table 3 Parameters for longitudinal and transverse soil springs

轴向土弹簧			横向土弹簧		
$T_u/\text{kN}$	$x_u/\text{mm}$	$k_t/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	$P_u/\text{kN}$	$y_u/\text{mm}$	$k_l/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$
960	10.0	96	120960	420.0	288

## 2.2 地震动记录选取与处理

地震动固有的随机性, 包括峰值、持时、频谱等,

导致工程结构的地震反应存在很大的不确定性, 基于确定性分析很难可靠地预测结构的抗震性能<sup>[8, 20]</sup>。为了考虑概率分析中地震动的不确定性, FEMA P58 中建议结构在开展 IDA 分析过程中至少选取 7 条地震记录, 每条地震记录缩放 8 次<sup>[21-22]</sup>。本文选取 Bullock 等<sup>[23]</sup>推荐的适用于 IDA 计算的露头基岩地震动记录中的 17 组进行计算分析, 表 4 为地震动记录信息, 矩震级在 5 级到 8 级范围内。已有研究表明<sup>[24]</sup>, PGV 更适合作为地下结构最优地震强度指标, 因此对该组地震动进行 10 次调幅, 使得地震动 PGV 在 200~2000 mm/s, 将其幅值折半后作为工程基岩位置处地震输入, 开展增量动力分析<sup>[5-6]</sup>。

考虑到土体的非线性, 采用等效线性化的方法, 开发了一维等效线性化场地地震反应分析计算程序<sup>[25]</sup>, 结合土体动剪切模量比和动阻尼比曲线(如图 4 所示), 通过计算获取不同深度土层在不同地震动作用下的等效剪切模量和等效阻尼比, 将其代入式 (3), (4) 中计算, 即可获得后续一维自由场分析所需的不同埋深土层的等效剪切模量和 Rayleigh 阻尼系数<sup>[26]</sup>。

$$E_{eq} = 2G_{eq}(1 + \mu), \quad (3)$$

表 4 地震动记录信息

Table 4 Information of ground motion records

序号	震级	时间	地震名称	台站	PGA/g	PGV/(mm·s <sup>-1</sup> )
1	6.69	1994	Northridge-01	LA - Wonderland Ave	0.10	76
					0.16	146
2	7.62	1999	Chi-Chi_Taiwan	CHY102	0.04	68
					0.05	56
3	7.62	1999	Chi-Chi_Taiwan	HWA035	0.08	11
					0.07	67
4	7.62	1999	Chi-Chi_Taiwan	KAU034	0.06	20
					0.01	25
5	7.62	1999	Chi-Chi_Taiwan	TAP086	0.04	97
					0.05	80
6	7.62	1999	Chi-Chi_Taiwan	TCU088	0.53	34
					0.52	14
7	7.62	1999	Chi-Chi_Taiwan	TTN028	0.02	37
					0.02	27
8	6.05	1994	Northridge-02	Lake Hughes #12A	0.01	3
					0.02	4
9	5.9	1999	Chi-Chi_Taiwan-02	ILA015	0.01	8.5
					0.01	10
10	6.2	1999	Chi-Chi_Taiwan-05	HWA002	0.03	31
					0.03	34
11	6.3	1999	Chi-Chi_Taiwan-06	TTN042	0.03	26
					0.01	23
12	6.9	2008	Iwate_Japan	IWTH18	0.13	42
					0.04	36
13	6.9	2008	Iwate_Japan	MYGH03	0.08	25.5
					0.09	27.3
14	5.39	2008	14383980	Mount Wilson Obsv	0.02	9.0
					0.02	8.6
15	5.89	2004	Oroville-01	Oroville Seismograph Station	0.09	21
					0.07	23
16	5.19	2004	Anza (Horse Canyon)-01	Anza - Pinyon Flat	0.10	20
					0.12	50
17	5.45	2007	40204628	Hamilton Field	0.01	4.5
					0.01	5

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\xi_n}{\omega_i + \omega_j} \begin{Bmatrix} \omega_i \omega_j \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $E_{eq}$  为相应土层的等效弹性模量;  $G_{eq}$  为相应土层的等效剪切模量;  $\mu$  为相应土层的泊松比;  $\alpha, \beta$  为 Rayleigh 阻尼系数;  $\xi_n$  为在频域等效线性化自由场地震反应分析计算得到的等效阻尼比;  $\omega_i, \omega_j$  分别为自由场的一阶和二阶自振频率。

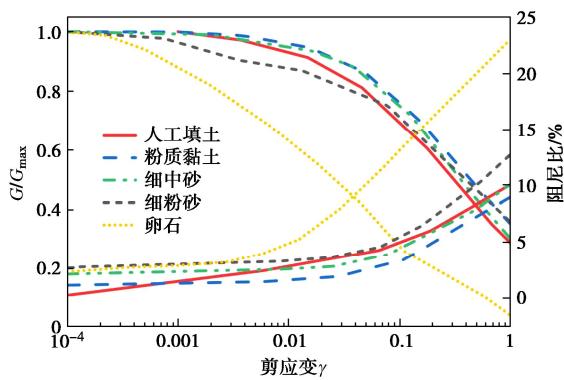


图 4 土体动剪切模量比和动阻尼比曲线

Fig. 4 Curves of dynamic shear modulus and damping ratio

将获取的各土层等效弹性模量和 Rayleigh 阻尼系

数用于一维自由场模型建立中, 一维自由场底部采用黏弹性边界<sup>[27]</sup>, 将调幅后的露头基岩地震动折半后输入到基岩位置开展一维自由场分析, 提取综合管廊底板位置处的地震动时程曲线, 经延时处理后输入到综合管廊梁-弹簧模型中<sup>[7-8]</sup>, 开展综合管廊 IDA 分析。

### 3 地震易损性分析

Vamvatsikos 等<sup>[28]</sup>提出了 IDA 方法, 该方法使用一簇调幅后的地震动开展非线性动力学分析, 以获得目标工程结构在各种地震强度水平下的动力响应, 该方法很好地考虑了地震动的不确定性。在易损性分析中, 首先需要确定合适的地震动强度指标 IM, 并在此基础上确定结构的损伤指标 DM, 绘制结构的地震易损性曲线, 进而评估结构在不同地震强度水平下的损伤概率。

#### 3.1 综合管廊损伤状态定义

综合管廊纵向地震易损性分析的目的是为了确定在特定地震动强度下管廊达到特定极限状态的概率, 因此对管廊在地震作用下的极限状态进行划分是非常必要的。长线型综合管廊接口是抗震薄弱环节, 因此

本文将管廊接口张开量作为结构损伤指标进行分析。根据综合管廊领域相关规范和学者的研究<sup>[13, 17, 29]</sup>, 定义了基于接口张开量最大值  $d_{\max}$  为损伤指标的综合管廊损伤状态, 将结构的破坏状态划分为正常使用、轻微破坏、中等破坏和严重破坏 4 个等级, 表 5 为综合管廊接口张开量的不同损伤状态对应的最大接口张开量界限值。

表 5 综合管廊损伤状态定义

Table 5 Definition of damages states for utility tunnel

性能水准	评价指标范围/mm	评价指标中位值/mm
基本完好	$d_{\max} \leq 2$	—
轻微破坏	$2 < d_{\max} \leq 10.5$	6.3
中等破坏	$10.5 < d_{\max} \leq 15.0$	12.8
严重破坏	$d_{\max} > 15.0$	15.0

### 3.2 地震动强度指标优化选取

地震动强度指标 IM 是影响结构地震风险评估准确性的重要参数, 在基于性能的地震工程研究框架中发挥着重要作用, 合理的地震动强度指标可以使结构地震反应预测结果更加准确。目前, 最常用、且最容易提取的 3 个地表地震动强度指标有峰值加速度 PGA、峰值速度 PGV 以及峰值位移 PGD<sup>[30]</sup>。同时, 本文在基岩位置进行地震动输入, 展开场地分析获取综合管廊底板位置处地震动记录输入到梁-弹簧模型中。因此, 基岩位置地震动峰值加速度 PBA、峰值速

度 PBV 以及峰值位移 PBD 和管廊底板位置处地震动峰值加速度 PTA、峰值速度 PTV 以及峰值位移 PTD 在本文中也进行考虑。

已有研究结果表明<sup>[31]</sup>, 结构损伤指标 DM 与地震动强度指标 IM 存在以下关系:

$$DM = a(IM)^b \quad (5)$$

将式 (5) 取对数后得

$$\ln DM = \ln a + b \ln IM \quad (6)$$

利用最小二乘法将对数形式的损伤指标的  $\ln(DM)$  和地震动强度指标  $\ln(IM)$  进行线性回归分析, 进而获得式 (6) 的经验拟合式, 拟合式的平均标准偏差  $\beta_D$  为

$$\beta_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln DM - (\ln a + b \ln IM)]^2}{n-2}} \quad (7)$$

式中:  $a$  和  $b$  为根据计算结果拟合得到的系数;  $n$  为非线性动力时程分析的次数。

平均标准偏差  $\beta_D$  越小, 说明地震动强度指标离散性越小, 越适合作为地震动强度指标。图 5 为不同地震动强度指标的相关性分析结果, 并对不同工况的平均标准偏差  $\beta_D$  进行统计绘制柱状图, 如图 6 所示。可以看出, PTV 作为地震动强度指标时, 结果离散度最小, 平均标准偏差  $\beta_D$  最小, 拟合效果最好, 这与禹海涛等<sup>[9]</sup>研究结果基本一致。因此后续考虑采用

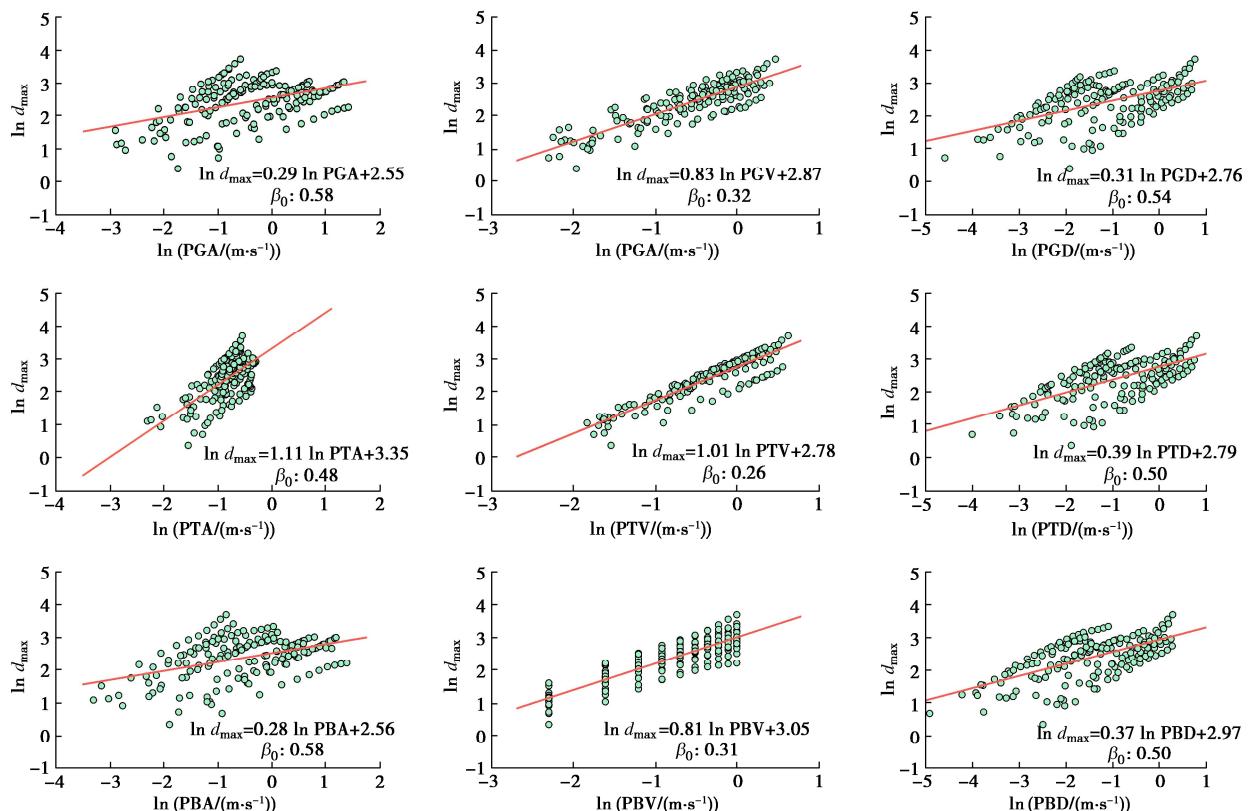


图 5 损伤指标回归分析

Fig. 5 Regression analysis of damage measures

PTV 作为地震动强度指标绘制综合管廊地震易损性曲线。同时,考虑到地震动监测台站布设的大部分位于地表或接近地表的位置,相对于基岩位置和管廊底板埋深位置,地表位置处的地震动更容易获取<sup>[32]</sup>,为了使结果更具有适用性,同时绘制以地表地震动 PGV 为地震动强度指标的综合管廊易损性曲线(相对于 PGA 和 PGD, PGV 拟合效果最好)。

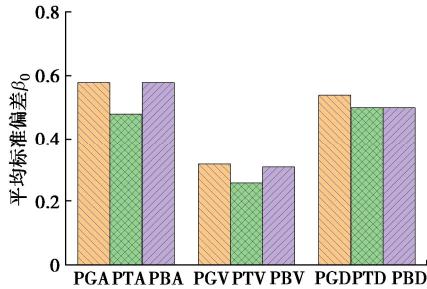


图 6 地震动强度指标离散性对比

Fig. 6 Comparison of description of different IMs

### 3.3 地震易损性曲线绘制

一般假设地震易损性曲线服从双参数对数正态分布<sup>[31]</sup>,其计算函数可定义为

$$P_f(d_s \geq d_{si} | S) = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{tot}} \cdot \ln \left( \frac{S}{S_{mi}} \right) \right] \quad (8)$$

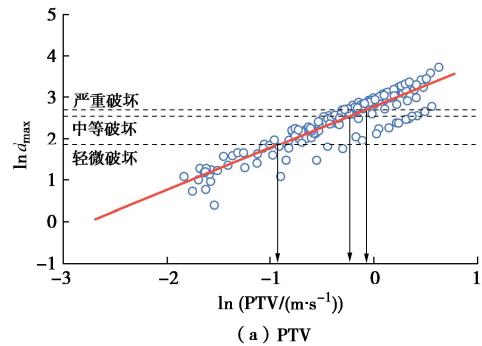
式中:  $P_f$  为结构或构件的失效概率;  $d_s$  为在某一地震动强度下结构达到的某一性能水准;  $S$  为本文中选定的地震动强度指标;  $\Phi$  为标准正态累积概率函数;  $S_{mi}$  为导致某一损伤状态下地震动强度指标的中间临界值;  $\beta_{tot}$  为总的对数正态标准偏差,

$$\beta_{tot} = \sqrt{\beta_{DS}^2 + \beta_C^2 + \beta_D^2} \quad (9)$$

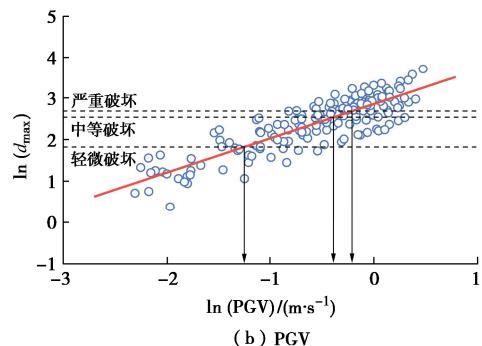
式中:  $\beta_{DS}$  为结构损伤状态的不确定性,文献[33]中地震灾害损失风险评估软件对建筑物的要求取  $\beta_{DS}$  为 0.4;  $\beta_C$  为地下结构地震动响应与承载力的变化,文献[34]中 BART 系统的开挖隧道分析取  $\beta_C=0.3$ ,但本文结构形式是固定的,因此在计算中忽略了此项系数;  $\beta_D$  为在不同的地震动作用下得到的结构性能损伤的对数变量的平均标准偏差,已在 3.2 节获取。

IDA 分析完成后,通过对对数坐标下的数据点进行回归分析获取线性拟合曲线,结合表 5 给出的综合管廊在不同极限状态下对应的损伤指标临界值  $d_{si}$ ,将  $d_{si}$  取对数代入 DM 和 IM 指标的线性关系式中即可求得对应损伤状态的  $S_{mi}$ ,最大接口张开量  $d_{max}$  与 PTV (PGV) 线性拟合结果如图 7 所示。将不同损伤状态的  $S_{mi}$  和由式(9)计算获取的对数正态标准偏差  $\beta_{tot}$  代入式(8)中,计算出综合管廊在不同地震动强度水平下的损伤概率,进而绘制以 PTV 和 PGV 为 IM 的综合管廊易损性曲线,如图 8 所示,可以直观地看出不

同地震动强度下综合管廊发生轻微破坏、中等破坏和严重破坏时的超越概率。对于本文特定的 II 类场地而言,结构发生不同程度破坏超越概率为 50% 时对应的底板位置处的峰值速度 PTV 分别为 385, 785, 925 mm/s, 对应的地表位置处的峰值速度 PGV 分别为 429, 871, 1023 mm/s。



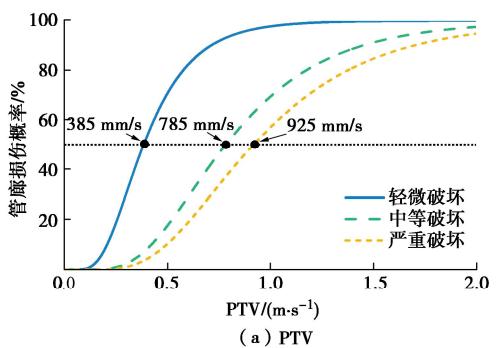
(a) PTV



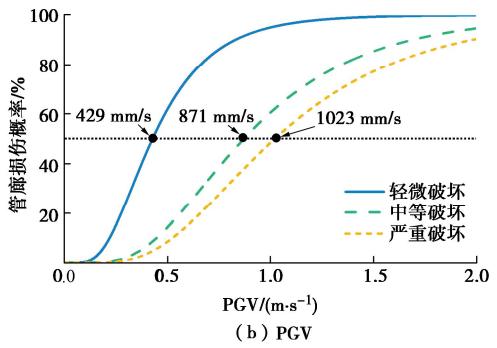
(b) PGV

图 7 最大接口张开量  $d_{max}$  与 IM 线性拟合结果

Fig. 7 Linear regression of  $d_{max}$  and IM



(a) PTV



(b) PGV

图 8 综合管廊地震易损性曲线

Fig. 8 Seismic fragility curves of utility tunnel

为了验证数值分析易损性曲线是否有效合理, 将本文所得易损性曲线与美国生命线联盟(American Lifelines Alliance, ALA)规范<sup>[35]</sup>中施工质量良好的经验易损性曲线进行了对比。由于 ALA 中对隧道严重破坏的统计数据库不全面, 因此本文仅将分析结果与轻微和中等破坏时的经验曲线进行了对比, 未对比严重破坏时数值分析曲线的结果。从图 9 中可以看出, 轻微破坏的易损性曲线与 ALA 结果基本吻合; 中等破坏的易损性曲线略小于 ALA 的结果, 但最大偏差不大于 15%。由于 ALA 的经验易损性曲线是根据震害统计得来的, 未考虑具体土体特性, 统计对象包括高速公路、铁路等多种研究对象, 具有较大的不确定性, 且震害记录多是记录的软弱场地的结构损伤情况, 因此该偏差理论上是合理的, 这也验证了本文所得到的结果具有一定的参考价值。

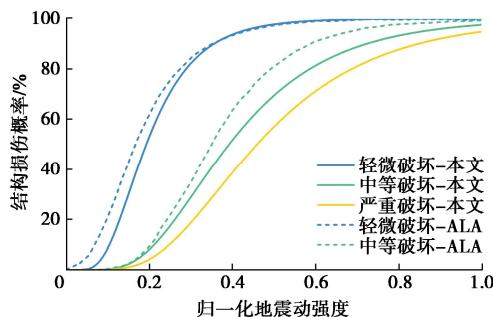


图 9 地震易损性曲线对比

Fig. 9 Comparison of seismic fragility curves

根据上述提出的综合管廊地震易损性曲线, 可以估计给定地震动强度下综合管廊损伤的概率。根据规范<sup>[11]</sup>, II 类场地 50 a 超越概率分别为 63%, 10%, 2% 的不同地震烈度级别的最大考虑地震 PGA 分别为 0.20g, 0.40g, 0.62g。Power 等<sup>[36]</sup>通过对大量可获取的地震动开展统计分析, 给出了 PGA 转化 PGV 的近似理论, 如表 6 所示。由于本研究使用的地震动的矩震级和震源-场地距离各不相同, 因此本研究采用表 6 中所有系数的平均值作为 PGA 转化 PGV 的系数。同时, 结合基于地表 PGV 为地震动强度绘制的地震易损性曲线, 给出了综合管廊在不同地震动强度下的失效概率, 用于综合管廊的地震风险评估, 如表 7 所示。

表 6 PGV 转 PGA 系数<sup>[36]</sup>

Table 6 Ratios of PGV to PGA

震级( $M_w$ )	震源-场地距离/km		
	0~20	20~50	50~100
6.5	940	1020	1090
7.5	1400	1270	1550
8.5	1800	1880	1930

表 7 不同地震动强度下综合管廊的失效概率

Table 7 Failure probabilities of utility tunnel at corresponding seismic intensity levels

地震动强度	PGA/ g	PGV/ (mm·s <sup>-1</sup> )	场地 类别	失效概率/%			
				基本 完好	轻微 破坏	中等 破坏	严重 破坏
多遇地震动	0.20	286	II	78.5	20.0	0.8	0.7
设计地震动	0.40	572	II	28.9	50.5	7.6	13.0
罕遇地震动	0.62	887	II	7.9	40.8	12.2	39.1

## 4 结 论

本文以长线型单舱综合管廊为研究对象, 采用 OpenSees 有限元平台建立了综合管廊梁-弹簧简化模型, 考虑了土体在地震动下的非线性特性。将基于 IDA 分析的结构易损性评价方法进一步拓展至长线型综合管廊抗震性能评价中, 基于 IDA 结果对地震动强度指标进行优选, 并提出了综合管廊不同极限状态的定义准则, 最终建立了典型 II 类场地中长线型综合管廊地震易损性曲线, 得到以下 2 点结论。

(1) 以基岩位置、综合管廊底板位置以及地表位置等不同场地位深位置处的地震动峰值参数为地震动强度指标进行损伤指标回归分析, 根据结果的离散性和对数标准差可以看出, 综合管廊底板位置处的峰值速度 PTV 最适合作为长线型综合管廊地震易损性分析的地震动强度指标。

(2) 提出了以综合管廊底板位置处的峰值速度 PTV 和易获取的地表位置处峰值速度 PGV 为地震动强度指标的地震易损性曲线, 给出了综合管廊在不同地震动强度下的失效概率, 可以有效地预测不同强度地震动作用下的结构的失效概率, 对同类型下综合管廊抗震性能快速评价具有一定参考性。

## 参考文献:

- [1] 钱七虎. 建设城市地下综合管廊, 转变城市发展方式[J]. 隧道建设, 2017, 37(6): 647-654. (QIAN Qihu. To transform way of urban development by constructing underground utility tunnel[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(6): 647-654. (in Chinese))
- [2] CHEN J, JIANG L Z, LI J, et al. Numerical simulation of shaking table test on utility tunnel under non-uniform earthquake excitation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2012, 30: 205-216.
- [3] 梁建文, 李东桥, 王长祥, 等. 考虑预应力影响的壳-弹簧模型及其在预制地下管廊纵向抗震分析中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(4): 13-22. (LIANG Jianwen, LI Dongjiao, WANG Changxiang, et al. Shell-spring model for

- longitudinal seismic analysis of precast utility tunnels considering prestress[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*. 2021, **41**(4): 13-22. (in Chinese))
- [4] TANG G Y, FANG Y M, ZHONG Y, et al. Numerical study on the longitudinal response characteristics of utility tunnel under strong earthquake: a case study[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020: 8813303.
- [5] 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): 916-924. (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): 916-924. (in Chinese))
- [6] ZHONG Z L, SHEN Y Y, ZHAO M, et al. Seismic performance evaluation of two-story and three-span subway station in different engineering sites[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2021, **26**(14): 1-31.
- [7] ZHONG Z L, FILIATRAULT A, AREF A. Numerical simulation and seismic performance evaluation of buried pipelines rehabilitated with cured-in-place-pipe liner under seismic wave propagation[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2017, **46**(5): 811-829.
- [8] LI J Q, ZHONG Z L, WANG S R, et al. Seismic fragility analysis of water supply pipelines retrofitted with corrosion-protection liner buried in non-uniform site[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024, **176**: 108333.
- [9] 禹海涛, 李心熙, 袁勇, 等. 沉管隧道纵向地震易损性分析方法[J]. *中国公路学报*. 2022, **35**(10): 13-22. (YU Haitao, LI Xinxi, YUAN Yong, et al. Seismic vulnerability analysis method for longitudinal response of immersed tunnels[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, **35**(10): 13-22. (in Chinese))
- [10] LONG X H, MA Y T, MIAO Y, et al. Longitudinal seismic fragility analysis of long tunnels under multiple support excitation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023, **164**: 107608.
- [11] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB50909—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. (Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures: GB50909—2014[S]. Beijing, China Planning Press, 2014. (in Chinese))
- [12] SILVIA M, FRANK M, MICHAEL H S, et al. OpenSees command language manual[Z]. Berkeley: Earthquake Engineering Center, University of California, 2009.
- [13] 城市综合管廊工程技术规范: GB50838—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. (Technical Code for Urban Utility Tunnel Engineering: GB50838—2015[S]. Beijing, China Planning Press, 2015. (in Chinese))
- [14] ZHAO J, SRITHARAN S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures[J]. *Aci Structural Journal*, 2007, **104**(2): 133-141.
- [15] FILIPPOU F C, POPOV E P, BERTERO V V. Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints[R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1983.
- [16] 冯立, 丁选明, 王成龙, 等. 考虑接缝影响的地下综合管廊振动台模型试验[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(4): 1295-1304. (FENG Li, DING Xuanming, WANG Chenglong, et al. Shaking table model test on seismic responses of utility tunnel with joint[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(4): 1295-1304. (in Chinese))
- [17] 胡正一. 非一致地震激励下预制装配式综合管廊结构纵向地震响应及易损性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2022: 11-31. (HU Zhengyi. Study on Longitudinal Seismic Response and Vulnerability of Composite Utility Tunnel Structure under Non-Uniform Seismic Excitation[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2022: 11-31. (in Chinese))
- [18] 城市轨道交通岩土工程勘察规范: GB50307—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. (Code for Geotechnical Investigation of Urban Rail Transit: GB50307—2012[S]. Beijing, China Planning Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 油气输送管道线路工程抗震技术规范: GB/T50470—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017 (Seismic Technical Code for Oil and Gas Transmission Pipeline Engineering: GB/T50470—2017[S]. Beijing, China Planning Press, 2017. (in Chinese)).
- [20] TSINIDIS G. Response characteristics of rectangular tunnels in soft soil subjected to transversal ground shaking[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*. 2017, **62**: 1-22.
- [21] FEMA. Seismic Performance Assessment of Buildings: Volume 1 Methodology[R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [22] FEMA. Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 2- Implementation Guide[R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [23] BULLOCK Z, LIEL A B, PORTER K A, et al. Site-specific liquefaction fragility analysis: cloud, stripe, and incremental

- approaches[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2021, **50**(9): 2529-2550.
- [24] CHEN Z Y, WEI J S. Correlation between ground motion parameters and lining damage indices for mountain tunnels[J]. *Natural Hazards*. 2013, **65**(3): 1683-1702.
- [25] 钟紫蓝, 史跃波, 李锦强, 等. 考虑土体动力特征参数相关性的工程场地随机地震反应分析[J]. *岩土力学*, 2022, **43**(7): 2015-2024. (ZHONG Zilan, SHI Yuebo, LI Jinqiang, et al. Stochastic seismic response analysis of engineering site considering correlations of critical soil dynamic parameters[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, **43**(7): 2015-2024. (in Chinese))
- [26] 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 Xiuli, XU Zigang, XU Chengshun, 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): 2155-2162. (in Chinese))
- [27] DU X L, ZHAO M. A local time-domain transmitting boundary for simulating cylindrical elastic wave propagation in infinite media[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, **30**(10): 937-946.
- [28] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, **31**(3): 491-514.
- [29] 城市轨道交通设计规范: DGJ08109—2004[S]. 上海: 同济大学出版社, 2017. (Urban Rail Transit Design Standard: DGJ08109—2004[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2017. (in Chinese))
- [30] 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*, 2021, **49**(1): 49-59. (HUANG Zhongkai, ZHANG Dongmei. Recent advance in seismic fragility research of underground structures[J]. *Journal of Tongji University*, 2021, **49**(01): 49-59. (in Chinese))
- [31] ARGYROUROUDIS S A, PITILAKIS K D. Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, **35**: 1-12.
- [32] 钟紫蓝, 冯立倩, 史跃波, 等. 序列型地震作用下地铁车站损伤分析[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(8): 1586-1594. (ZHONG Zilan, FENG Liqian, SHI Yuebo, et al. Seismic damage assessment of subway station subjected to mainshock aftershock sequences[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(8): 1586-1594. (in Chinese))
- [33] HAZUS-MHMR1. Multi-hazard Loss Estimation Model: Manual Advanced Engineering Building Module Methodology Earthquake Technical and User's[R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2003.
- [34] SALMON M, WANG J, JONES D, et al. Fragility formulations for the BART system[C]// Proceedings of the 6th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE, Long Beach, 2003.
- [35] American Lifelines Alliance. Seismic Fragility Formulations for Water Systems: Part 1 Guideline[M]. Reston: ASCEFEMA, 2005: 1-103.
- [36] POWER M, ROSIDI D, KANESHIRO J. Strawman: "Screening, Evaluation, and Retrofit Design of Tunnels" Report Draft[R]. New York: National Centre for Earthquake Engineering Research, 1996.