

文章编号:1008-1534(2025)02-0152-12

# TOD模式下上盖塔楼地铁车站结构地震易损性分析

李文博<sup>1</sup>,冯富强<sup>2</sup>,郭飞<sup>3</sup>,张彦华<sup>2</sup>,安军海<sup>2</sup>

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司,北京 100371; 2. 河北科技大学建筑工程学院,河北石家庄 050018; 3. 北京市政建设集团有限责任公司,北京 100045)

**摘要:**为进一步探究上盖塔楼地铁车站的结构动力响应及损伤状况,推动以公共交通为导向的开发(transit-oriented development, TOD)模式体系的发展,开展了TOD模式下上盖塔楼地铁车站结构地震易损性分析。以北京某城市综合体工程为研究背景,综合考虑场地类别、输入地震动特性等因素的影响,建立了不同场地类别下的土-结构相互作用非线性分析模型,提出了一种TOD模式下上盖塔楼地铁车站结构抗震性能评估指标范围,并确定了其地震易损性曲线,进而得到不同损伤状态下的超越概率。结果表明:上盖塔楼地铁车站结构在基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌5种损伤状态下对应的抗震性能指标范围分别为 $[0, 0.136\%]$ 、 $(0.136\%, 0.324\%]$ 、 $(0.324\%, 0.664\%]$ 、 $(0.664\%, 1.122\%]$ 和 $(1.122\%, +\infty)$ ;近场脉冲型地震动对II类场地中结构地震动影响更大,远场长周期型地震动对III类场地中结构的影响更大;与近场脉冲型地震动和普通型地震动相比,远场长周期型地震动对场地类别更加敏感;地震动特性和场地类别对TOD模式下上盖塔楼地铁车站结构的动力响应有显著影响,相较于II类场地,III类场地中地震动特性对结构的影响更为显著且结构更容易遭受地震破坏。建立的结构易损性曲线和地震损伤状态概率表可有效评估TOD模式下上盖塔楼地铁车站的抗震性能,研究成果可为类似地下结构的抗震性能评价提供有价值的参考。

**关键词:**地下工程;地震易损性;地铁车站结构;TOD模式;增量动力分析法;超越概率

**中图分类号:**TU375.2 **文献标识码:**A **DOI:** 10.7535/hbgykj.2025yx02007

## Seismic vulnerability analysis of upper tower subway station structure in TOD mode

LI Wenbo<sup>1</sup>, FENG Fuqiang<sup>2</sup>, GUO Fei<sup>3</sup>, ZHANG Yanhua<sup>2</sup>, AN Junhai<sup>2</sup>

(1. Beijing Urban Construction Design & Development Group Company Limited, Beijing 100371, China; 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. Beijing Municipal Construction Group Company Limited, Beijing 100045, China)

**Abstract:** In order to further explore the structural dynamic response and damage status of the upper tower subway station and promote the development of the TOD (transit-oriented development) model system oriented by public transportation, the seismic vulnerability analysis of the upper tower subway station structure in the TOD model was carried out. Taking an urban

收稿日期:2024-09-20;修回日期:2025-02-09;责任编辑:王海云

基金项目:河北省自然科学基金(E2024208050);河北省高等学校科学技术研究项目(QN2023079)

第一作者简介:李文博(1985—),男,内蒙古赤峰人,高级工程师,博士,主要从事岩土与地下工程设计、施工方面的研究。

通信作者:安军海副教授。E-mail:tsanjunhai@126.com

李文博,冯富强,郭飞,等. TOD模式下上盖塔楼地铁车站结构地震易损性分析[J]. 河北工业科技, 2025, 42(2): 152-163.

LI Wenbo, FENG Fuqiang, GUO Fei, et al. Seismic vulnerability analysis of upper tower subway station structure in TOD mode[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2025, 42(2): 152-163.

complex project in Beijing as the research background, a nonlinear analysis model of soil-structure interaction under different site types was established by considering the influence of site types, input ground motion characteristics and other factors. A seismic performance evaluation index range of the upper tower subway station structure in TOD mode was proposed and its seismic vulnerability curve was determined, and then the exceedance probability under different damage states was obtained. The results show that the corresponding seismic performance index ranges of the upper tower subway station structure under the five damage states of basically intact, slight damage, moderate damage, severe damage and collapse are  $[0, 0.136\%]$ ,  $(0.136\%, 0.324\%]$ ,  $(0.324\%, 0.664\%]$ ,  $(0.664\%, 1.122\%]$  and  $(1.122\%, +\infty)$ , respectively. The near-field pulse-type ground motion has a greater impact on the ground motion of the structure under the Class II site, while the far-field long-period ground motion has a greater impact on the structure under the Class III site. Compared with near-field pulse-type ground motion and ordinary ground motion, far-field long-period ground motion is more sensitive to site category. The ground motion characteristics and site types have a significant impact on the dynamic response of the upper tower subway station structure under the TOD mode. Compared with the site type II, the ground motion characteristics of the site type III have a more significant impact on the structure and the structure is more vulnerable to earthquake damage. The established seismic vulnerability curve and seismic damage probability table can effectively evaluate the seismic performance of the upper tower subway station in TOD mode. The research results can provide valuable reference for the seismic performance evaluation of similar underground structures.

**Keywords:** underground construction; seismic vulnerability; subway station structure; TOD mode; incremental dynamic analysis method; exceedance probability

美国太平洋地震工程研究中心在地震工程全概率分析框架体系中提出了地震易损性模块,以此来表达不同强度地震作用下结构的损伤程度,以及结构不同损伤状态的超越概率。众学者对地上结构地震易损性研究较为广泛。陆新征等<sup>[1]</sup>采用增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)方法对比分析了单一水平分量地震动和三维地震动作用下 RC 框架结构及 RC 框架-核心筒结构的倒塌过程,研究表明三维地震动作用下结构会出现更多的倒塌模式,仅考虑单一地震动会使得结构易损性较小。邱永存<sup>[2]</sup>基于 IDA 方法对某钢筋混凝土框架进行分析,结果表明结构自身固有特性和地震动作用形式均影响结构延性,其中结构刚度因素起到主要控制作用。韩学川等<sup>[3]</sup>基于数值模拟方法研究了水平地震作用下上盖一体化地铁车站结构与单体车站结构动力响应的差异。杨连森等<sup>[4]</sup>对苏州某高层建筑进行了地震和风荷载联合作用下的易损性分析,结果表明在多灾害耦合作用下,随着耦合荷载的增大,结构各损伤状态的超越概率均有所增加。以上学者开展的地震易损性分析拓展了结构抗震性能的评价思路,但其研究对象仅为地上单体建筑结构。

近年来,随着城市人口的增长与聚集、地下空间的快速开发和利用,地下结构发展迅猛,对地下空间结构地震易损性的研究也逐渐展开<sup>[5]</sup>。美国生命线联盟(ALA)<sup>[6]</sup>和 HAZUS 系统<sup>[7]</sup>基于现有不同类型隧道的地震灾害损伤状态,绘制了不同地表峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)作用下结构的经验易损性曲线,对结构不同损伤状态的超越

概率进行了概述,预测了结构在不同强度地震作用下的损伤程度。目前,数值分析方法被广泛用于结构地震易损性分析。钟紫蓝等<sup>[8]</sup>基于 IDA 方法对 2 层 3 跨地铁车站进行地震易损性分析,定量给出了结构在不同损伤状态下的超越概率。董正方等<sup>[9]</sup>基于结构分析和设计软件 SAP2000 建立地下综合管廊结构模型,分析了不同场地类别、不同埋置深度和不同截面尺寸等因素对地下综合管廊结构易损性的影响。许民泽等<sup>[10]</sup>基于 OpenSees 软件平台对位于饱和砂土地场的地铁车站进行了结构易损性分析。HUANG 等<sup>[11]</sup>基于不同埋深隧道结构的 IDA 分析结果,绘制了上海软弱场地圆形隧道在横向地震作用下的易损性曲线。陈晋男等<sup>[12]</sup>利用 ABAQUS 软件进行建模,基于 IDA 方法分析了矩形装配式地铁车站结构在不同场地类别下的地震易损性。上述研究主要集中在单体的浅埋地下结构,但是,随着城市朝着集约化方向发展,地下结构愈发大型化,与周边地上建筑物的距离越来越远,致使二者相互产生巨大影响。因此,考虑临近地上结构或相连的地上结构对地下结构地震易损性影响的研究势在必行,但目前这方面的文献成果仍鲜有报道。

随着以公共交通为导向的开发(transit-oriented development, TOD)模式体系的迅猛发展,探究轨道交通 TOD 模式下的地铁车站综合体结构的地震易损性,不仅可以获取在不同强度地震作用下结构损伤状态的超越概率,而且还能评估震后损失提供数据支持,同时也可以为该结构体系的抗震设计提供参考。鉴于此,本文以北京通州某实际工程为研

究对象,基于 IDA 方法对 II 类场地和 III 类场地内 TOD 模式下的上盖塔楼地铁车站进行了地震易损性分析,以期为类似地下综合体结构的抗震性能评价提供新思路。

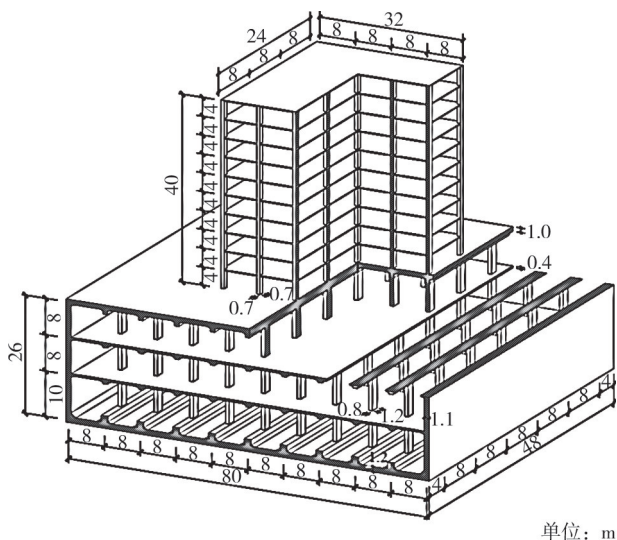
## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

北京通州某实际工程项目的 TOD 模式下上盖塔楼的地铁车站体系分为上盖框架结构和地铁车站 2 个部分,其中上盖框架结构高度为 40 m,长度为 32 m,宽度为 24 m,采用方形截面框架柱,截面尺寸为 0.7 m×0.7 m,与地铁车站顶板刚性连接。上盖塔楼地铁车站的横截面长度为 80 m,宽度为 48 m,高度为 26 m,分为上、中、下 3 层,每层层高分别为 8、8、10 m;结构侧墙厚度为 1.1 m;顶板、中板和底板厚度分别为 1.0、0.4、1.2 m;综合体结构中柱尺寸为 0.8 m×1.2 m,分布间距为 8 m。上盖框架结构中,除中柱采用 C45 混凝土外,其余构件均采用 C40 混凝土,如图 1 所示。

### 1.2 场地条件

为了分析场地类别对上盖塔楼地铁车站的地震易损性的影响,分别针对中硬场地(II类场地)和软弱场地(III类场地)工况下的结构地震易损性开展了试验研究。中硬场地工况选取北京通州某上盖塔楼的地铁车站所在场地,计算该场地土体等效剪切波



单位: m

图 1 TOD 模式下上盖塔楼地铁车站的三维剖面示意图

Fig. 1 3D sectional schematic diagram of upper tower subway station in TOD mode

速为 336.13 m/s,场地类别为 II 类场地,场地土层厚度为 80 m。软弱场地工况选取苏州某地铁车站综合体所属场地,该场地土体等效剪切波速为 198.58 m/s,场地土体相对软弱,承载力较低,场地类别为 III 类场地,场地土层厚度也取为 80 m。2 种场地均将物理性质相似的土层合并简化为 6 个土层。土层的主要物理力学参数如表 1 所示。

表 1 土层的物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

场地类别	土层类别	土层厚度 $h/m$	密度 $\rho /$ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	剪切波速 $V_s/(\text{m}/\text{s})$	泊松比 $\nu$
II 类场地	杂填土	4.0	1 750	10	8	92	180	0.35
	粉土填土	6.0	1 800	14	30	171	220	0.37
	粉质黏土	6.0	1 900	36	18	472	280	0.41
	黏土	10.0	1 950	20	30	213	300	0.43
	中粗砂	24.0	2 100	0	33	837	350	0.28
	卵石圆砾	30.0	2 150	0	14	1 000	500	0.20
III 类场地	杂填土	4.0	1 600	10	8	92	120	0.45
	淤泥质土	7.5	1 680	10	12	120	140	0.42
	淤泥粉质黏土	8.0	1 750	13	18	140	150	0.39
	软黏土	12.5	1 850	15	22	180	180	0.37
	细粉砂	28.0	1 900	30	34	653	230	0.30
	中粗砂	20.0	2 050	31	33	837	280	0.28

## 2 结构抗震性能评价指标

### 2.1 综合体结构性能指标的定义

GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》<sup>[13]</sup>中划分了结构的不同损伤状态。杜修力等<sup>[14]</sup>基于地下结构 Pushover 方法对大量地下地铁车站结构进行分析,以层间位移角(inter-story drift

ratio, IDR)为限值将结构划分为 4 种性能水准和 5 种损伤状态。本文依据实际工程开展数值模拟分析,利用有限元软件 ABAQUS 建立三维土-结构动力相互作用分析模型,如图 2 所示。模型尺寸设置为 560 m×64 m×80 m,整体长度为 560 m,即两侧各取 3 倍综合体车站断面长度,高度为 80 m,底部延伸至基岩面。模拟中,土体选用 Mohr-Coulomb

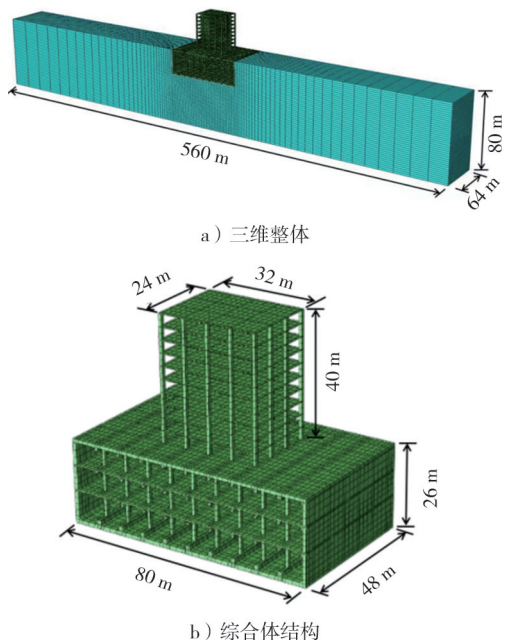


图 2 三维土-结构动力相互作用分析模型

Fig. 2 3D soil-structure dynamic interaction analysis model

本构模型,结构选用混凝土塑性损伤本构模型,混凝土中钢筋采用理想弹塑性本构模型。建立不同土体和整体结构的三维实体模型,钢筋则以桁架单元形式嵌入在结构混凝土中。结构与土体接触面采用表面-表面接触,其中主表面和从表面分别取为结构外表面和土体表面。接触属性设置包括法向采用“硬”接触,切向行为采用“罚函数”摩擦,摩擦系数取值为 0.4。

Pushover 方法分析过程分为 2 步:1)通过地应力平衡计算获得重力作用下的应力场分布;2)采用地下结构 Pushover 方法进行分析,侧向施加倒三角分布的绝对加速度荷载使结构到目标位移<sup>[15]</sup>。重力分析时,模型边界条件设置为底部固定约束,两侧边界仅放开竖向自由度;本文采用 Pushover 方法分析时,底部边界条件不变,两侧边界设为滚轴边界,上盖结构部分折算成均布荷载施加在综合体结构顶板上,两侧加载倒三角分布的水平位移。Pushover 方法分析加载示意图如图 3 所示。

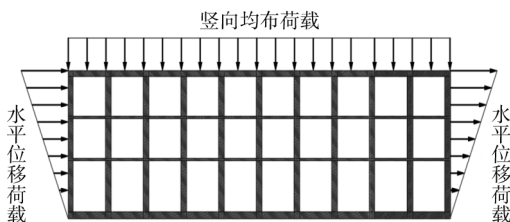
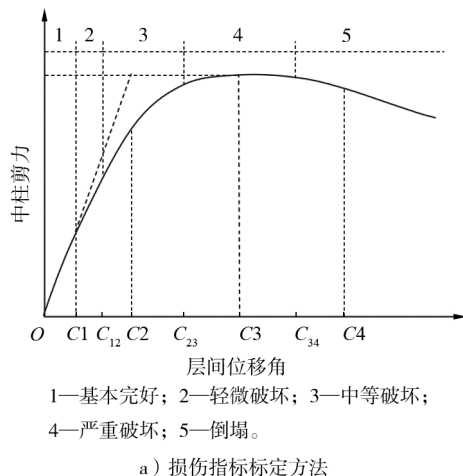


图 3 Pushover 方法分析加载示意图

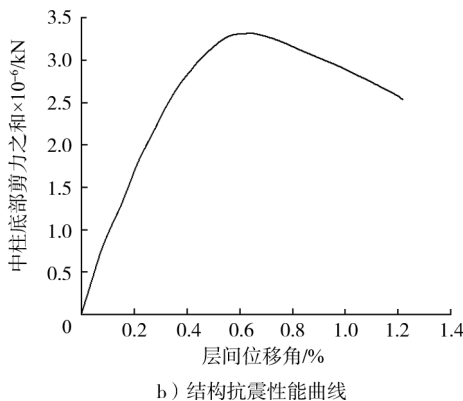
Fig. 3 Pushover method analysis loading diagram

参考文献[8]在极限状态的定义过程中,通过 Pushover 方法得到的层间位移角-中柱剪力 Pushover

曲线来划分出地铁车站结构的 4 个极限状态点 C1—C4,如图 4 a)所示。图中:阶段 O—C1 代表结构基本处于线弹性状态,极限状态点 C1 是曲线初始阶段斜率开始改变的节点;阶段 C1—C2 代表结构由线弹性逐渐过渡到弹塑性状态,极限状态点 C2 的横坐标由初始阶段 Pushover 曲线的斜率延伸线与中柱剪力峰值的交点来确定;极限状态点 C3 为 Pushover 曲线上的中柱剪力峰值点对应的层间位移角;极限状态点 C4 为 Pushover 曲线中柱剪力下降至峰值的 85%时对应的最大层间位移角。分别将  $C_{12}$ 、 $C_{23}$ 、 $C_{34}$  定义为极限状态点线段 C1—C2、C2—C3、C3—C4 的中值点,则  $[0, C1]$ 、 $(C1, C_{12}]$ 、 $(C_{12}, C_{23}]$ 、 $(C_{23}, C_{34}]$  和  $(C_{34}, +\infty)$  分别对应结构在 5 种损伤状态下的抗震性能指标范围。



a) 损伤指标标定方法



b) 结构抗震性能曲线

图 4 层间位移角-中柱剪力 Pushover 曲线

Fig. 4 Pushover curve of interstory drift ratio and shear force of middle column

在地震过程中,结构底层中柱由于埋置深度较大,故其承受压力较大,因此更容易发生破坏。参考 DU 等<sup>[16]</sup>的研究,结构底层中柱变形能力不足是结构倒塌的重要因素,中柱的破坏形态往往可在一定程度上表征整个结构的破坏程度。分析获得 TOD 模式下上盖塔楼地铁车站的结构抗震性能曲线,如图 4 b)所示。

杜修力等<sup>[14]</sup>依据地铁车站的功能状态将车站结构划分为4个性能水准,并定性描述了其功能状态,如表2所示。

表2 地铁车站的结构性能水准划分及定义

Tab. 2 Structural performance level classification and definition for subway stations

性能水准	功能状态	定性描述
LS1	正常使用	结构中柱无损坏,侧墙和顶底板无可见裂缝,结构正常使用
LS2	可以使用	结构构件出现轻微破坏,结构中柱、顶底板和侧墙出现轻微裂缝
LS3	修复后使用	结构构件中等破坏,出现穿过保护层裂缝,结构未倒塌
LS4	不能使用	结构构件严重破坏,强度退化,形成破碎带,可能发生倒塌

根据表2,本文以最大层间位移角( $\theta_{\max}$ )作为评价指标,对地震作用下上盖塔楼地铁车站的损伤状态进行了定义,其损伤状态和对应的评价指标范围

如表3所示。

表3 地震作用下上盖塔楼地铁车站结构的损伤状态定义

Tab. 3 Definition of structural damage state of upper tower subway station under earthquake action

损伤状态	评价指标范围/%
基本完好	$\theta_{\max} \leq 0.136$
轻微破坏	$0.136 < \theta_{\max} \leq 0.324$
中等破坏	$0.324 < \theta_{\max} \leq 0.664$
严重破坏	$0.664 < \theta_{\max} \leq 1.122$
倒塌	$1.122 < \theta_{\max}$

## 2.2 二维有限元模型的建立

因为车站综合体结构为双对称结构,且所在场地土层分布均匀,所以在进行弹塑性时程分析时将结构横向抗震问题简化为二维平面应变问题,据此本文建立二维土-结构整体有限元模型进行IDA分析,如图5所示。

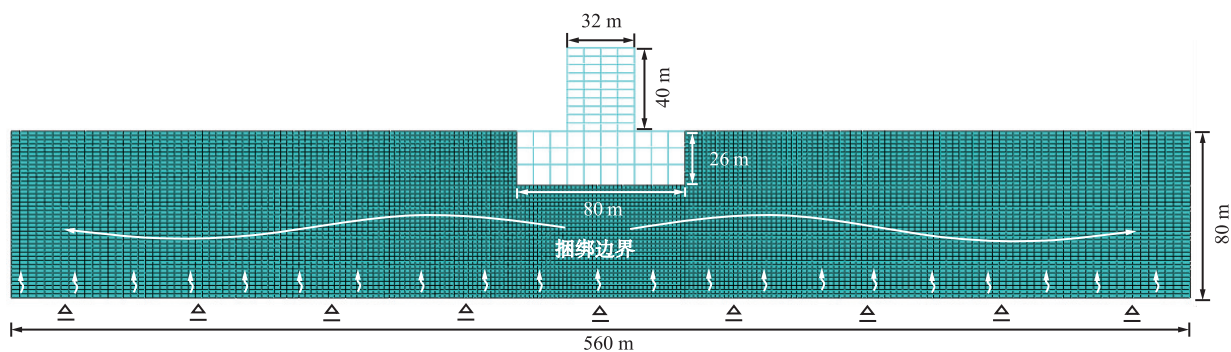


图5 土-结构整体有限元模型

Fig. 5 Soil-structure finite element model

土-结构整体有限元模型的横向计算宽度取为560 m,竖向高度取至基岩处,为80 m。土体单元采用四节点双线性平面应变单元(CPE4R),结构周围土体网格进行加密,上盖框架结构和地铁车站的构件均采用梁单元建模,内部钢筋通过关键字“\* rebar”进行定义。土体和结构接触界面采用表面-表面接触,结构外表面设置为主表面,土体表面设置为从表面。接触属性设置包括:法向行为采用“硬”接触;切向行为采用摩擦接触,并将摩擦接触设置为“罚函数”,摩擦系数取为0.4。模型侧边界采用捆绑边界,底部边界设置为水平向自由、竖向约束。先施加重力荷载进行重力分析,然后在模型底部输入水平向地震动进行时程分析。

## 2.3 地震波的选取

地震动是地球内部能量释放的结果,对其波动特性的分析在地震工程中具有重要作用。研究发现地震动可以分为近场脉冲型和远场长周期型两大

类,它们分别在震源附近和远离震源的地区表现出截然不同的波动特征。为了更好地探究不同地震动作用下结构的抗震性能,本文依据GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》<sup>[13]</sup>得到设计地震动加速度反应谱。之后,将其作为选波的目标反应谱从太平洋地震工程研究中心(pacific earthquake engineering research center, PEER)数据库中筛选出合适的地震波,定义为普通地震动。

本文将断层距作为关键参数,并据此来划分近场脉冲型地震动和远场长周期型地震动:通常,将断层距定义在20~60 km范围内;将断层距小于20 km的地震动定义为近场脉冲型地震动;而将断层距大于60 km的地震动定义为远场长周期型地震动。这种划分是基于地震动在不同断层距下的传播特性:近场脉冲型地震动具有较高频率和振幅;而远场长周期型地震动低频成分丰富且振幅较小。近场脉冲型地震动、远场长周期型地震动选取准则分别依据表4、表5。

表 4 近场脉冲型地震动选取准则

Tab. 4 Selection criteria of near-field pulse type ground motion

地震震级 $M_w$	断层距 $R/\text{km}$	峰值速度 $\text{PGV}/(\text{cm}/\text{s})$	脉冲指数 $\text{PI}$	傅里叶频域/ $\text{Hz}$
$\geq 6.5$	$\leq 20$	$\geq 30$	$> 0.85$	$0 \sim 2$

注:BAKER<sup>[17]</sup>提出表征脉冲型地震动脉冲特性程度的峰值速度比和能量比的指数 PI。当地震动脉冲指数  $\text{PI} > 0.85$  时,则定义为脉冲型地震动。

表 5 远场长周期型地震动选取准则

Tab. 5 Selection criteria of far-field long-period ground motion

断层距 $R/\text{km}$	峰值加速度 $\text{PGA}$	峰值速度 $\text{PGV}/\text{峰值加速度}$ $\text{PGA}$	周期的平方加权平均值 $\beta_1$	傅里叶频域/ $\text{Hz}$
$\geq 60$	$\geq 0.02g$	$< 0.2$	$> 0.4$	$0 \sim 2$

注:LIAO 等<sup>[18]</sup>认为  $\text{PGV}/\text{PGA} < 0.2$  表示脉冲不明显;李雪红等<sup>[19]</sup>提出周期的平方加权平均值  $\beta_1$  作为长周期型地震动的界定指标,且  $\beta_1 > 0.4$  的地震动为长周期型地震动。

对于普通地震动的选取,GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》<sup>[13]</sup>指出所选地震动的加速度反应谱曲线与设计地震动加速度反应谱曲线的差值应小于 5%。依据规范可知,北京通州场地类别为 II 类场地,场地的抗震设防烈度为 8 度,设

计基本地震加速度取值为  $0.2g$ ,特征周期值为  $0.4\text{ s}$ ;苏州某工程场地类别为 III 类场地,场地设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度取值为  $0.2g$ ,特征周期取值为  $0.35\text{ s}$ 。设计地震动加速度反应谱图如图 6 所示。

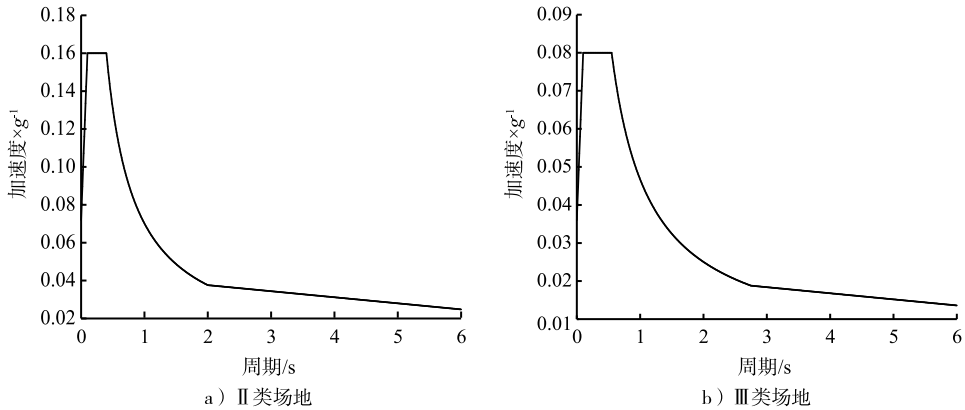


图 6 设计地震动加速度反应谱图

Fig. 6 Design ground motion acceleration response spectrum

VAMVATSIKOS 等<sup>[20]</sup>研究发现在进行 IDA 分析时为消除地震动对于地震易损性结果的影响,要选取 10~20 条足够数量的地震动进行输入分析。本文依据场地类别、断层距、傅里叶频域、地震震级和脉冲指数等主要参考指标,在 PEER 地震动数据

库中选取了近场脉冲型地震动、远场长周期型地震动和普通型地震动 3 种类型地震波各 15 条进行分析。图 7 和图 8 给出了所选取的 II 类和 III 类场地的地震动加速度反应谱图。

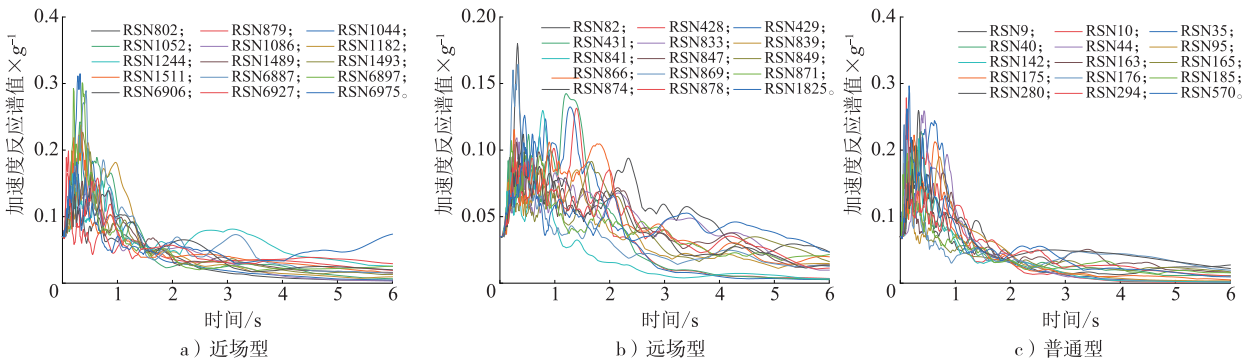


图 7 阻尼为 5% 时 II 类场地的地震动加速度反应谱图

Fig. 7 Class II site ground motion acceleration response spectrum with damping of 5%

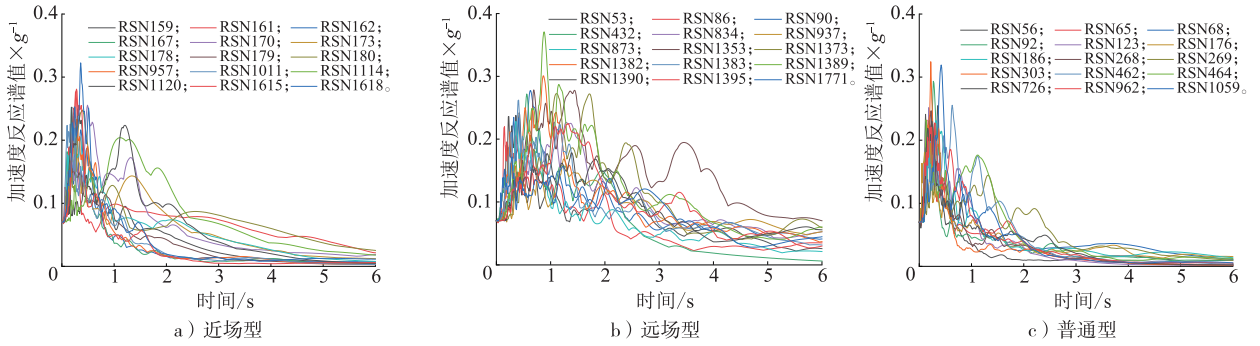


图 8 阻尼为 5% 时 III 类场地的地震动加速度反应谱

Fig. 8 Class III site ground motion acceleration response spectrum with damping of 5%

### 3 地震易损性分析

#### 3.1 概率需求分析

本文选择最大层间位移角  $\theta_{max}$  作为结构损伤指标 (damage measure, DM), 选用峰值加速度 PGA

作为地震动强度指标 (intensity measure, IM)。将计算结果整理得到 IDA 曲线簇, 将其均值和标准差分别以 16%、50% 和 84% 分位数整理出 3 条回归曲线, 即不同场地的 IDA 分位数曲线图, 以此来表征数据的平均性和离散性, 如图 9 所示。

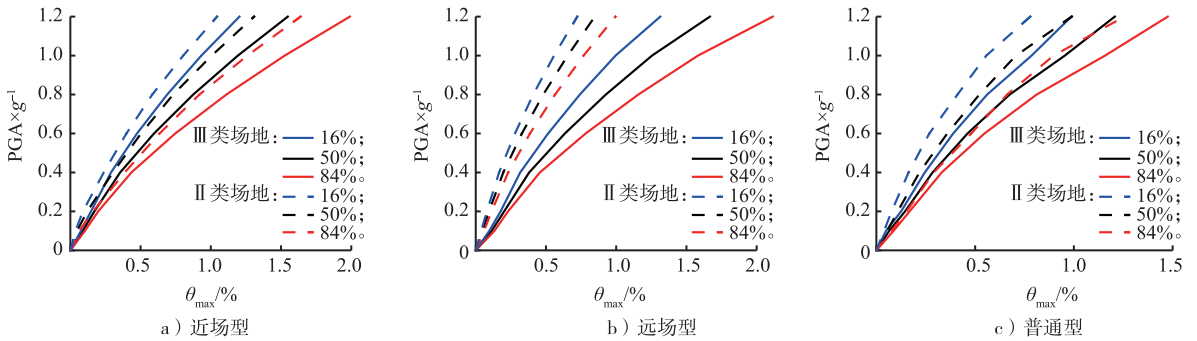


图 9 不同场地的 IDA 分位数曲线

Fig. 9 IDA quantile curve of different sites

随着 PGA 的增大, 不同场地类别、不同地震波特性的  $\theta_{max}$  不断增大。整体来看, 在相同的 PGA 下 III 类场地中的地铁车站结构比 II 类场地会产生更大的  $\theta_{max}$ 。其中, 在远场长周期型地震动作用下, III 类场地中的地铁车站结构比 II 类场地产生更大的  $\theta_{max}$ , 这说明 III 类场地对远场长周期型地震动最敏感, 普通型地震动次之, 对近场脉冲型地震动最不敏感。

根据已有的结构地震易损性研究, DM 和 IM 之间的关系式如式 (1) 所示:

$$DM = a \cdot IM^b, \quad (1)$$

式中:  $a$  和  $b$  均为线性回归系数。

将选取的地震动强度指标 (PGA) 和结构损伤指标 ( $\theta_{max}$ ) 带入式 (1), 得到式 (2):

$$\theta_{max} = a (PGA)^b. \quad (2)$$

或两边取对数, 得到式 (3):

$$\ln(\theta_{max}) = a \ln(PGA) + b. \quad (3)$$

图 10 和图 11 表达了分别位于 II 类场地和 III 类场地时, TOD 模式下上盖塔楼地铁车站的 DM 与

IM 之间的关系及线性拟合方程, 即 DM-IM 线性拟合曲线。

II 类场地中, 普通型地震动线性拟合方程的方差最小, 但 III 类场地中其方差最大, 两者差值较大。相比之下, 近场脉冲型地震动与远场长周期型地震动在 2 种场地中拟合方程的方差差值较小。这说明通过规范法筛选出的普通型地震动作用的随机性较大, 相比学者提出的选波方法得到的研究结果, 在地震动特性影响方面不具有普适性, 同时, 场地类别、输入地震动特性等因素对地铁车站结构有显著影响。

位于 II 类场地时的一元线性回归方程为

$$\ln(\theta_{max}) = 1.32387 \ln(PGA) - 4.60714,$$

$$\ln(\theta_{max}) = 1.15269 \ln(PGA) - 5.00486,$$

$$\ln(\theta_{max}) = 1.18695 \ln(PGA) - 4.94367.$$

位于 III 类场地时的一元线性回归方程为

$$\ln(\theta_{max}) = 1.11949 \ln(PGA) - 4.52001,$$

$$\ln(\theta_{max}) = 1.08020 \ln(PGA) - 4.46498,$$

$$\ln(\theta_{max}) = 1.14749 \ln(PGA) - 4.72092.$$

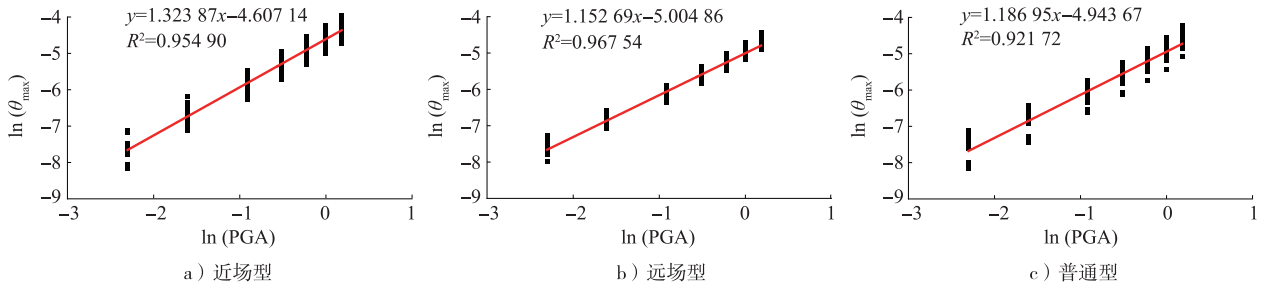


图 10 II 类场地 DM-IM 线性拟合曲线  
 Fig. 10 DM-IM linear fitting curve of type II site

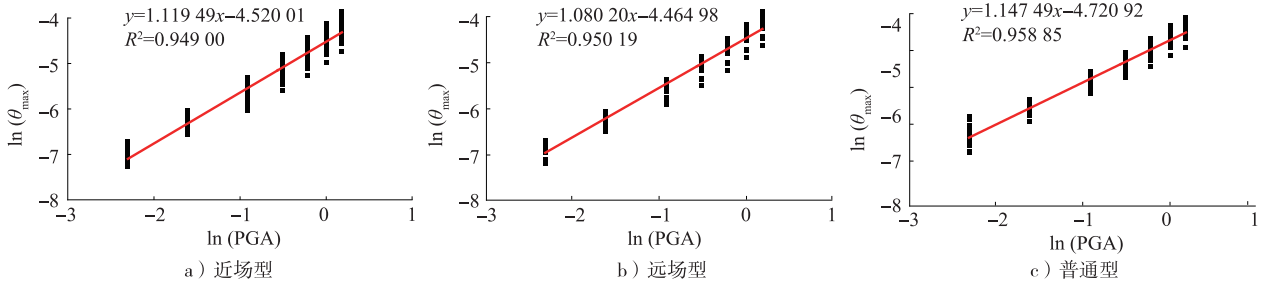


图 11 III 类场地 DM-IM 线性拟合曲线  
 Fig. 11 DM-IM linear fitting curve of type III site

3.2 结构易损性曲线的绘制

结构易损性曲线描述了结构的性能参数与地震强度之间的关系。ARGYROUDIS 等<sup>[21]</sup>和 ZHONG 等<sup>[22]</sup>指出,结构 4 个不同性能水准的超越概率计算公式如式(4)所示。

$$P(LS) = \Phi \left[ \frac{a + b \ln(IM) - \ln(D_c)}{\sqrt{\beta_{DM-IM}^2 + \beta_c^2}} \right], \quad (4)$$

式中:  $P(LS)$  为不同性能水准的超越概率;  $D_c$  为

5 种损伤状态时的层间位移角限值;  $\Phi$  为标准正态分布函数;  $\beta_c$  为防灾能力对数标准差;  $\beta_{DM-IM}$  为结构的防灾性能需求 DM 对数正态分布的标准差。其中,当以 PGA 作为地震动强度指标(IM)时,

$$\sqrt{\beta_{DM-IM}^2 + \beta_c^2} = 0.5.$$

通过式(4)计算得到结构的超越概率,分别绘制了位于 II 类场地和 III 类场地的上盖塔楼地铁站的易损性曲线,如图 12 所示。

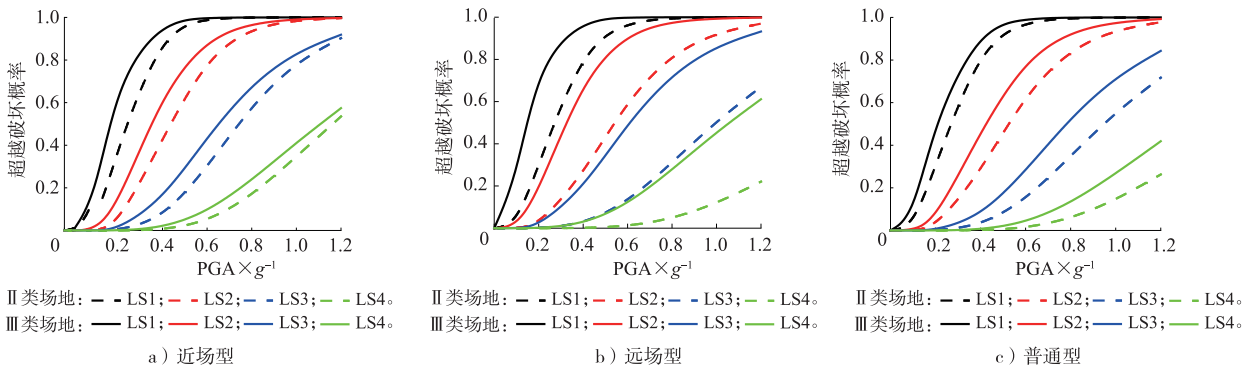


图 12 不同场地类别中结构的易损性曲线  
 Fig. 12 Structural vulnerability curve under different sites

在不同场地类别条件下,地下综合体结构的易损性曲线所呈现的规律基本一致,4 个性能水准的超越概率随着地震动强度的增大而增大。随着场地类别的提高(等效剪切波速增加),结构易损性曲线呈现越平缓的趋势,即结构在 II 类场地中不易受到破坏,并且结构受近场脉冲型地震动影响较大,在相同性能水准下的超越概率也比普通型和远场长周

期型地震动的大。而位于 III 类场地时,结构会受到远场长周期型地震动的影响,超越概率显著上升,超过了近场脉冲型地震动和普通地震动对结构破坏的影响。这是因为远场长周期型地震动主要以中低频为主,通过软土层时会被过滤掉高频成分并放大低频频成分,使地震动幅值放大数倍,致使结构受到严重破坏。相比于普通型和近场脉冲型地震动,远场



长周期型地震动下, II类、III类场地的结构易损性曲线相差较大,这说明远场长周期型地震动对场地类别更加敏感。

### 3.3 结构破坏状态概率评估

结构损伤状态概率  $P(DS_i)$  表示在不同强度地震动作用下, 结构处于不同损伤状态时的概率。其计算公式如式(5)所示。

$$P(DS_i) = \begin{cases} 1 - P(LS_i), & i = 1, \\ P(LS_{i-1}) - P(LS_i), & i = 2, 3, \dots, N, \\ P(LS_N), & i = N + 1, \end{cases} \quad (5)$$

式中: 结构划分性能水准的数量为  $N$ ; 结构定义的损伤状态数量为  $N+1$ 。

通过式(5)计算得到 TOD 模式上盖塔楼地铁车站的 5 种损伤状态的超越破坏概率, 得到不同场地类别的结构损伤状态概率图, 如图 13 所示。可以得到以下结论。

1) 对于 II 类、III 类场地的上盖塔楼地铁车站, 在 3 种类型地震动作用下的基本完好状态发生概率均呈单调递减的变化规律; 整体上, 轻微破坏、中等破坏和严重破坏状态的发生概率呈先增后减的变化规律; 倒塌状态的发生概率则呈单调递增的变化规律; 特别的, 对于 II 类场地中的上盖塔楼地铁车站, 在普通型地震动和远场长周期型地震动作用下的严重破

坏状态发生概率呈单调递增趋势。这表明 II 类场地条件下的上盖塔楼地铁车站更容易受到近场脉冲型地震动的影响。

2) 轻微破坏、中等破坏和严重破坏状态在 2 种场地条件下发生的峰值概率基本一致, 为 50% 左右; 当结构损伤状态的发生概率相同时, II 类场地的 PGA 值总是比 III 类场地的 PGA 值更大。这表明土层较软的 III 类场地中的上盖塔楼地铁车站相对 II 类场地更容易受到地震动的影响。

3) 在 3 种类型地震动作用下, 2 种场地中结构的 5 种损伤状态概率曲线变化趋势一致。其中, 近场脉冲型地震动作用下的 II 类场地的 5 种损伤状态概率曲线分别与相应的 III 类场地损伤状态概率曲线的重合度最高, 普通型地震动作用下的 2 种场地曲线重合度次之, 远场长周期型地震动作用下的 2 种场地曲线重合度最低。在远场长周期型地震动和普通型地震动作用下, II 类场地与 III 类场地的不同结构损伤状态概率峰值对应的 PGA 值, 随着损伤状态的恶化相差越大; 就倒塌状态的峰值结构损伤状态概率来看, 远场长周期型地震动下 II 类场地与 III 类场地的差值是最大的, 这说明 III 类场地上盖塔楼地铁车站结构的影响程度比 II 类场地的更大, 即 III 类场地中上盖塔楼地铁车站结构更容易受到远场长周期型地震动的影响。

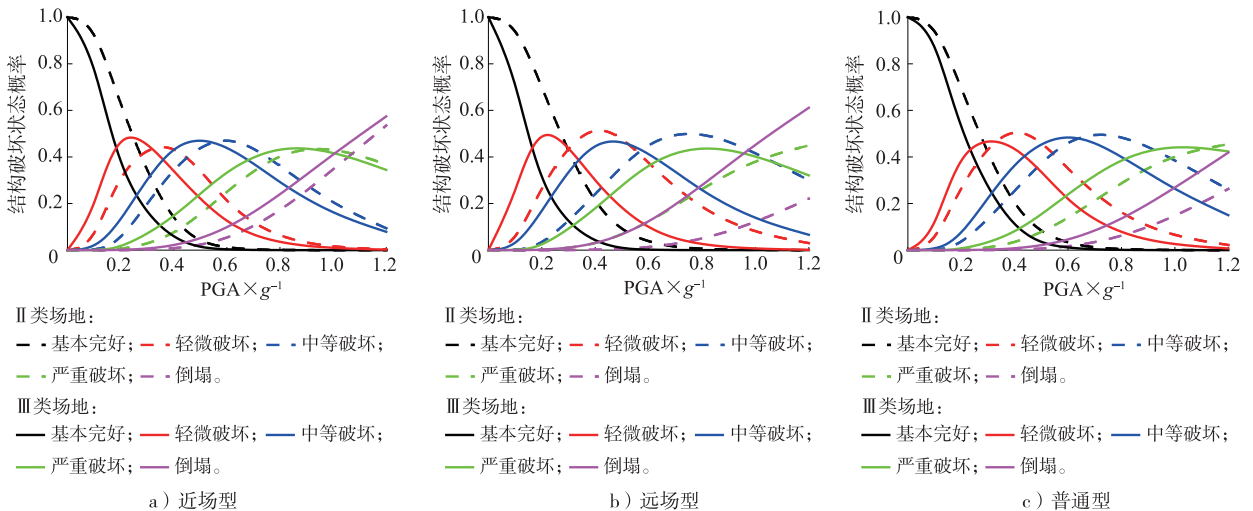


图 13 不同场地类别的结构损伤状态概率图

Fig. 13 Probability diagram of structural failure state under different sites

GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》<sup>[23]</sup>指出: 多遇地震动峰值加速度宜按不低于基本地震动峰值加速度的 1/3 确定; 罕遇地震动峰值加速度宜按基本地震动峰值加速度的 1.6~2.3 倍确定; 极罕遇地震动峰值加速度宜按基本地震动峰值加速度的 2.7~3.2 倍确定。本文设计基本地震动峰值加速度取值为 0.2g, 于是多遇地震、设防地震、罕遇地

震、极罕遇地震的设防标准分别取值为 0.1g、0.2g、0.4g 和 0.6g。

表 6—8 给出了 3 种不同类型地震动作用下上盖塔楼地铁车站在不同地震设防标准下的损伤状态概率。数据表明, 在 II 类场地条件下, 不同类型地震动对上盖塔楼地铁车站的损伤状态概率影响差异显著。比较 2 种场地中的车站综合体结构在各级地震设防

表 6 近场脉冲型地震动作用下的结构损伤状态概率表

Tab. 6 Probability table of structural failure state under near-field pulse-type ground motion

场地类别	地震设防标准	损伤状态概率				
		基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
II 类场地	多遇	<b>98.26</b>	<u>1.74</u>	0.00	0.00	0.00
	设防	<b>60.84</b>	<u>36.95</u>	2.19	0.02	0.00
	罕遇	5.94	<b>51.05</b>	<u>37.66</u>	5.12	0.23
	极罕遇	0.42	18.05	<b>51.98</b>	<u>25.52</u>	4.03
III 类场地	多遇	<b>84.01</b>	<u>15.67</u>	0.32	0.00	0.00
	设防	28.88	<b>59.21</b>	<u>11.47</u>	0.44	0.00
	罕遇	1.75	33.72	<b>50.13</b>	<u>13.25</u>	1.15
	极罕遇	0.13	9.89	<b>46.12</b>	<u>35.24</u>	8.62

注:同一地震设防标准下的损伤状态概率之和为 100%,将最大概率数据用加粗字体显示,并将其对应的损伤状态定义为“主要损伤状态”;加下划线数据表示“更严重损伤状态概率”。

表 7 普通型地震动作用下的结构损伤状态概率表

Tab. 7 Probability table of structural failure state under ordinary ground motion

场地类别	地震设防标准	损伤状态概率				
		基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
II 类场地	多遇	<b>98.43</b>	<u>1.56</u>	0.01	0.00	0.00
	设防	<b>69.41</b>	<u>29.35</u>	1.23	0.01	0.00
	罕遇	12.76	<b>59.76</b>	<u>25.39</u>	2.04	0.05
	极罕遇	1.78	33.99	<b>50.01</b>	<u>13.09</u>	1.13
III 类场地	多遇	<b>93.65</b>	<u>6.30</u>	0.05	0.00	0.00
	设防	47.41	<b>47.86</b>	<u>4.64</u>	0.09	0.00
	罕遇	4.89	<b>48.31</b>	40.31	<u>6.16</u>	0.33
	极罕遇	0.48	19.28	<b>52.31</b>	<u>24.30</u>	3.63

注:同一地震设防标准下的损伤状态概率之和为 100%,将最大概率数据用加粗字体显示,并将其对应的损伤状态定义为“主要损伤状态”;加下划线数据表示“更严重损伤状态概率”。为了更好地比较“更严重损伤状态”概率,这里将 III 类场地中罕遇地震设防标准下的更严重损伤状态定义为严重破坏,其概率为 6.16%。

表 8 远场长周期型地震动作用下的结构损伤状态概率表

Tab. 8 Probability table of structural failure state under far-field long-period ground motion

场地类别	地震设防标准	损伤状态概率				
		基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
II 类场地	多遇	<b>98.29</b>	<u>1.70</u>	0.01	0.00	0.00
	设防	<b>69.83</b>	<u>28.96</u>	1.19	0.02	0.00
	罕遇	14.04	<b>60.42</b>	<u>23.72</u>	1.77	0.05
	极罕遇	2.20	36.88	<b>48.57</b>	<u>11.45</u>	0.90
III 类场地	多遇	<b>75.93</b>	<u>23.34</u>	0.73	0.00	0.00
	设防	21.37	<b>61.33</b>	<u>16.42</u>	0.85	0.03
	罕遇	1.10	27.85	<b>52.11</b>	<u>17.11</u>	1.83
	极罕遇	0.08	7.55	<b>42.55</b>	<u>38.60</u>	11.22

注:同一地震设防标准下的损伤状态概率之和为 100%,将最大概率数据用加粗字体显示,并将其对应的损伤状态定义为“主要损伤状态”;加下划线数据表示“更严重损伤状态概率”。

标准下的主要损伤状态发现:多遇地震(0.1g)时,结构表现为基本完好状态;设防地震(0.2g)时,II类场地中的结构以基本完好状态为主,III类场地中的结构则以轻微破坏状态为主;罕遇地震(0.4g)时,II类场地中的结构以轻微破坏状态为主,III类场地中的结构则以中等破坏状态为主;而在极罕遇地震(0.6g)时,2种

场地中的结构都以中等破坏为主,但II类场地中的结构发生轻微破坏的概率约为 30%,而III类场地中的结构则发生严重破坏。分析结果表明,结构位于III类场地时的损伤状态总是比位于II类场地时更严重。这表明随着场地土体等效剪切波速的增加,即场地土越是坚硬,结构遭受破坏的程度越低。

由于同类场地在各级地震设防标准下的主要损伤状态基本一致,本文定义表格中比主要损伤状态更严重一级的损伤状态为更严重损伤状态。比较同一场地中的结构在不同类型地震动时的更严重损伤状态概率,近场脉冲型地震动使得Ⅱ类场地的结构发生更严重损伤状态的概率远大于普通型、远场长周期型地震动;远场长周期型地震动使得Ⅲ类场地的结构发生更严重损伤状态的概率远大于普通型、近场脉冲型地震动。这表明场地类别和地震动类型显著影响结构的抗震响应规律。

## 4 结 语

以北京某城市综合体工程为研究对象,建立土-结构相互作用的数值分析模型,进行地震易损性分析,得到的主要结论如下。

1) 基于实际工程建立 TOD 模式下上盖塔楼地铁车站的三维有限元模型,采用 Pushover 方法的倒三角形位移对地下结构加载,得到了 TOD 模式下上盖塔楼地铁车站结构在 5 种损伤状态下对应的抗震性能评价指标范围分别为  $[0, 0.136\%]$ 、 $(0.136\%, 0.324\%]$ 、 $(0.324\%, 0.664\%]$ 、 $(0.664\%, 1.122\%]$  和  $(1.122\%, +\infty)$ 。

2) 在三维有限元模型基础上简化得到二维有限元模型,采用增量动力分析方法对其输入不同特性的地震动。整体来看,在相同的 PGA 值下Ⅲ类场地中的地铁车站结构比Ⅱ类场地的地铁车站结构会产生更大的  $\theta_{max}$ 。Ⅲ类场地中的地铁车站结构对远场长周期型地震动最敏感,普通型地震动次之,对近场脉冲型地震动最不敏感。规范法筛选出的普通型地震动作用的随机性较大,在地震动特性影响方面不具有普适性。

3) 在不同场地类别条件下,地下综合体结构的易损性曲线所呈现的规律基本一致,4 个性能水准的超越概率随着地震动强度的增大而增大。相较于Ⅱ类场地,Ⅲ类场地中地震动特性对结构的影响更为显著,且结构更容易遭受地震破坏。

4) 土层较软的Ⅲ类场地中的上盖塔楼地铁车站结构相对Ⅱ类场地更容易受到地震动的影响。同时,Ⅱ类场地中的上盖塔楼地铁车站结构更容易受到近场脉冲型地震动的影响,Ⅲ类场地中的上盖塔楼地铁车站结构更容易受到远场长周期型地震动的影响。

5) 近场脉冲型地震动使得Ⅱ类场地中的结构发生更严重破坏状态的概率远大于普通型、远场长周期型地震动;远场长周期型地震动使得Ⅲ类场地中

的结构发生更严重损伤状态的概率远大于普通型、近场脉冲型地震动。场地类别和地震动类型显著影响结构的抗震响应规律。

本文基于 IDA 方法开展了 TOD 模式下地铁车站综合体结构在不同场地类别、不同地震动类型下的地震易损性分析,其成果可为评估类似结构体系的抗震性能提供有益的参考。同时,地铁车站综合体结构具有明显的空间效应,但地震易损性分析结果是基于二维数值模型得到的,具有一定的局限性,在今后的研究工作中需要进一步建立合适的三维数值模型以开展更深入的易损性分析。

## 参考文献/References:

- [1] 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):1-7.  
LU Xinzheng, 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): 1-7.
- [2] 邱永存. 基于 IDA 的 RC 框架整体延性[D]. 北京:北京林业大学,2014.  
QIU Yongcun. Global Ductility of Reinforced Concrete Frames Based on IDA[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [3] 韩学川,陶连金,安韶,等. 上盖一体化地铁车站结构非线性地震响应分析[J]. 防灾减灾工程学报,2022,42(4):788-795.  
HAN Xuechuan, TAO Lianjin, AN Shao, et al. Nonlinear seismic response analysis of integrated subway station structure [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4): 788-795.
- [4] 杨连森,陈鑫,谈丽华,等. 地震和风耦合作用下连体高层建筑联合易损性分析方法研究[J]. 计算力学学报,2023,40(6):902-911.  
YANG Liansen, CHEN Xin, TAN Lihua, et al. Study on joint fragility analysis method of conjoined high-rise buildings under combined actions of earthquake and wind [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023, 40(6): 902-911.
- [5] 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):165-171.  
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): 165-171.
- [6] ALLIANCE A L. Seismic Fragility Formulations for Water Systems: Part 1-Guideline[M]. Reston: ASCE, FEMA, 2001: 1-96.
- [7] GODA K, DE RISI R. Multi-hazard loss estimation for shaking and tsunami using stochastic rupture sources [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 28: 539-554.
- [8] 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 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.
- [9] 董正方, 刘淦之, 曾繁凯, 等. 基于修正 IDA 法的隧道地震易损性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(17): 106-115.  
DONG Zhengfang, LIU Ganzhi, ZENG Fankai, et al. Seismic vulnerability analysis of tunnel based on modified IDA method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(17): 106-115.
- [10] 许民泽, 崔春义, 李静波, 等. 饱和砂土场地中地铁车站结构地震易损性分析[J]. 工程力学, 2021, 38(增刊 1): 251-258.  
XU Minze, CUI Chunyi, LI Jingbo, et al. Seismic vulnerability analysis of subway station embedded in saturated sand layers[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(sup1): 251-258.
- [11] HUANG Zhongkai, 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.
- [12] 陈晋男, 杜修力, 许成顺, 等. 基于 IDA 方法的矩形装配式地铁车站结构地震易损性评价[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(7): 37-46.  
CHEN Jinnan, DU Xiuli, XU Chengshun, et al. Seismic vulnerability evaluation of rectangular prefabricated subway station structure based on IDA method[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(7): 37-46.
- [13] GB 50909—2014, 城市轨道交通结构抗震设计规范[S].
- [14] 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.  
DU Xiuli, JIANG Jiawei, XU Zigang, 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.
- [15] 刘晶波, 刘祥庆, 薛颖亮. 地下结构抗震分析与设计的 Pushover 方法适用性研究[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 49-57.  
LIU Jingbo, LIU Xiangqing, XUE Yingliang. Study on applicability of a pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 49-57.
- [16] DU Xiuli, JIANG Jiawei, 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.
- [17] BAKER J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486-1501.
- [18] LIAO W I, LOH C H, WAN S. Earthquake responses of RC moment frames subjected to near-fault ground motions[J]. The Structural Design of Tall Buildings, 2001, 10(3): 219-229.
- [19] 李雪红, 王文科, 吴迪, 等. 长周期地震动的特性分析及界定方法研究[J]. 振动工程学报, 2014(5): 685-692.  
LI Xuehong, WANG Wenke, WU Di, et al. The bounded method and characteristics analysis for long-period ground motions[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014(5): 685-692.
- [20] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [21] 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.
- [22] ZHONG Zilan, SHEN Yiyao, ZHAO Mi, et al. Seismic fragility assessment of the Daikai subway station in layered soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 132: 106044.
- [23] GB 18306—2015, 中国地震动参数区划图[S].