

DOI: 10.11779/CJGE202107002

基于拟静力推覆分析的大开车站和区间隧道地震损伤研究

许紫刚¹, 许成顺^{*2}, 杜修力², 吴晔²

(1. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 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: 目前关于大开车站及区间隧道地震损伤的研究多集中于动力时程分析方面, 但其呈现建模过程复杂, 计算效率不高等特点。以原始大开车站、区间隧道以及新建大开车站为研究对象, 首先, 开展了构件层面的拟静力推覆分析, 考虑地震荷载下中柱所受的荷载与约束条件, 获得了不同竖向压力下中柱的抗震性能曲线; 其次, 开展了土-结构体系的拟静力推覆分析, 采用改进的地下结构 Pushover 分析方法, 再现了水平和竖向地震荷载作用下大开车站及区间隧道结构的地震破坏情况。分析结果表明: 大开车站较区间隧道的横向和纵向跨度更大, 尤其是考虑竖向地震动作用后, 中柱的轴压比显著提升, 普通钢筋混凝土中柱易出现变形能力不足而引起的脆性破坏; 新建的大开车站中柱采用钢管混凝土结构, 相同荷载工况下其表现出更好的承载力和延性性能, 极大地提高了车站结构的安全性能。

关键词: 大开车站; 拟静力推覆分析; 竖向地震动; 轴压比; 地震损伤

中图分类号: TU92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)07-1182-10

作者简介: 许紫刚(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事城市地下结构抗震与减震控制等方面的教学和科研工作。E-mail:
3124@ecjtu.edu.cn。

Seismic damage of Daikai station and tunnel based on quasi-static pushover analysis

XU Zi-gang¹, XU Cheng-shun², DU Xiu-li², WU Ye²

(1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang
330013, China; 2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of
Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: At present, the researches on the seismic damage of Daikai station and tunnel are mostly focused on dynamic time history analysis. However, they are characterized by a complicated modeling process and low calculation efficiency. The original Daikai station and tunnel as well as the newly built Daikai station are taken as examples. Firstly, the pseudo-static pushover analysis of the components is carried out considering the load and restraint conditions of the central columns under the seismic loads, and the seismic performance curves of the columns under different vertical compression loads are obtained. Secondly, the pseudo-static pushover analysis of the soil-structure system is performed by using the improved pushover analysis method, and the seismic damage of the Daikai station and tunnel is reproduced under horizontal and vertical earthquake loads. The analysis results show that the horizontal and longitudinal spans of Daikai station are larger than those of the tunnel. The axial compression ratio of the central columns significantly increases, especially after considering the earthquake loads. The ordinary reinforced concrete columns of Daikai station are prone to brittle failure caused by insufficient deformation capacity. The concrete-filled steel tube structure is applied in the central columns of newly built Daikai station. Under the same load conditions, the newly built central column shows better bearing capacity and ductility performance, which greatly improves the safety performance of the station structure.

Key words: Daikai station; quasi-static pushover analysis; vertical earthquake load; axial compression ratio; seismic damage

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504305); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200636)

收稿日期: 2020-10-15

*通信作者(E-mail: xuchengshun@bjut.edu.cn)

0 引言

地下结构建设初期, 由于缺乏对地下结构动力响应特征的认识, 通常认为在周围土体的约束作用下, 地下结构相比于地上结构有更好的抗震性能。然而, 历史上多次大地震震害资料表明地下结构同样面临地震带来的威胁, 其地震破坏问题也较为突出。其中, 最为典型的是 1995 年日本阪神地区兵库县发生里氏 7.2 级地震, 神户市内大量的地铁车站及区间隧道等地下结构遭到破坏^[1]。此外, 1999 年土耳其 Kocaeli 地震、1999 年中国台湾 Chi-Chi 地震、2008 年中国汶川地震等均造成地下结构不同程度的破坏^[2-4]。

大开地铁车站是全球范围内首例在地震中遭受严重塌毁破坏的大型地下结构, 其震害资料保存比较完整, 此后的地下结构抗震研究工作多是基于大开地铁车站震害特点开展。对于大开地铁车站的破坏机理而言, 国内外学者基于不同的分析方法、分析模型及分析条件从不同的角度分析了大开车站的成灾机理, 并对其遭受地震破坏的原因作出解释。Iida 等^[5]认为由于强烈的水平地震作用, 车站中柱端部受弯剪作用达到了极限强度, 中柱受损后致使框架结构侧向承载能力降低并最终导致车站的整体破坏。Iwatate 等^[6]基于振动台模型试验和整体动力时程分析认为, 水平地震动使车站结构发生剪切变形, 中柱产生的应变是侧墙的 5 倍, 中柱由于抗剪承载能力不足而发生破坏, 并导致上顶板的坍塌。矢的照夫等^[7]通过二次拟静力推覆分析认为, 强大的水平荷载使中柱的抗剪能力达到屈服并逐渐产生破坏, 中柱的竖向承载能力也随之消失并在持续加载下发生整体的压弯破坏。以上研究强调了地层水平变形对地下结构产生的剪切破坏影响, 认为中柱的抗剪能力不足是大开地铁车站破坏的主要原因。An 等^[8]通过数值分析认为竖向地震动引起的中柱轴力变化改变了中柱抗剪能力和变形能力, 认为大开车站地震破坏是由于中柱抗剪能力和变形能力不足导致, 并给出了提高中柱抗剪和变形能力的建议。Hu 等^[9]比较了大开车站及区间隧道的地震响应, 结果表明隧道中柱配有适量箍筋, 隧道中柱有足够的延性抵抗地震引起的侧向位移而免于破坏。庄海洋等^[10]认为, 地震时车站顶板与侧墙的交叉部位和中柱的顶底端首先形成塑性铰, 使得上覆土的大部分重量传递到中柱, 导致中柱发生破坏, 进而引起车站顶板塌陷。Liu 等^[11]、刘祥庆等^[12]认为, 在地震作用下地下结构上覆土易丧失自身结构性, 使结构中柱以及顶板的荷载增大, 在高轴压与大弯矩作用下, 中柱上下端的塑性铰会进一步发展最终导致在这些部位发生压弯破

坏而折断。杜修力等^[13]通过整体动力分析发现在强震作用下大开车站的上覆土首先出现剪切破坏, 在竖向地震作用下, 其惯性力作用于车站结构上, 认为结构体系受力分配改变导致的侧墙、中柱变形能力不协调引起结构的破坏, 并通过离心机振动台试验加以验证^[14]。上述研究工作均认为由竖向地震动对地下结构的影响不可忽视, 这种作用极大地降低了地下结构关键构件抗剪承载能力和水平变形能力。

现有关于大开地铁车站和区间隧道结构的地震损伤研究主要采用振动台试验和数值模拟的方法, 不同研究者所选取的地震动和材料参数有较大差异, 因此得到的结论也略有不同。当采用动力时程分析方法研究大开车站和区间隧道的地震损伤时, 需要建立复杂的土和结构相互作用模型, 不仅有结构和土体的材料非线性, 还有两者之间的接触非线性, 同时也有复杂的地震输入和边界条件的设置。因此, 动力时程分析的计算效率不高, 尤其是涉及多种地震工况。本文首先系统介绍了大开地铁车站和区间隧道结构的震害概况, 基于大开地铁车站实际震害特点, 选取目前国内外研究中常用的结构和土体材料参数, 开展了构件层面和土-结构体系层面的拟静力推覆分析, 重点考虑了竖向地震荷载的作用, 采用改进的地下结构 Pushover 分析方法, 再现了水平和竖向地震荷载作用下大开车站及区间隧道结构的地震破坏情况。

1 工程概况

1.1 震害简介

1995 年 1 月 17 日在日本阪神地区兵库县发生里氏 7.2 级地震, 震中位于北纬 34.604° , 东经 135.034° , 震源深度约为 14 km。在神户市内 5 条地铁线路的 21 座车站中, 神户高速铁道大开站、长田站及之间的隧道部分, 神户市营铁道的三宫站、上泽站、新长田站、及部分隧道均发生不同程度的地震损伤。震害统计显示, 大开车站内共有 30 根中柱出现严重压曲的情况, 其纵向破坏情况如图 1 所示。大开地铁车站发生了几乎完全的塌毁破坏, 成为世界地震史上首例在地震中遭受塌毁破坏的大型地下结构。

根据震害特点, 将车站沿纵向分为 3 个区域: A 区域 (#1 柱至 #24 柱) 为靠长田站一侧的单层双跨结构。A 区域出现的震害最为严重, 该区域中柱主要有两种破坏形式: ①柱子钢筋左右大致对称压曲, 呈灯笼状, 如 #2 柱, ②柱子被单向压弯, 如 #10 柱。该区域的顶板发生扭卷并向下塌陷, 整体断面形状呈“M”形, 顶板中线两侧 2 m 内的纵向裂缝宽达 150~250 mm。顶板出现的横向裂缝大致沿纵向相等距离分

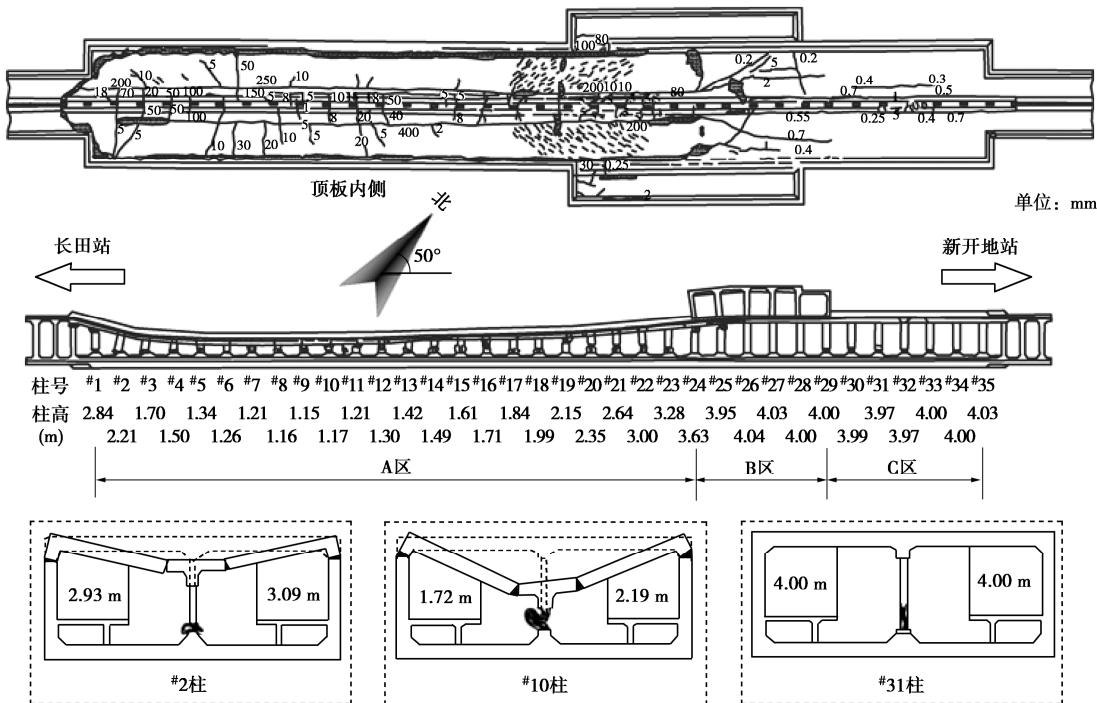


图 1 大开车站地震破坏情况

Fig. 1 Earthquake damage of Daikai station

布，大多出现在中柱的边缘，裂缝宽度达 70 mm。顶板与侧墙交界处的混凝土发生脱落，内侧的主筋发生失稳，外侧产生了最大为 200 mm 的裂缝，左右两侧侧墙上部均向内部发生了一定倾斜。B 区域 (#24~#29 柱) 为双层四跨结构。B 区域较其他两个区域的破坏程度轻，靠近 A 区域和 C 区域的过渡区域的中柱有 3 根遭受轻微损伤，呈压碎鼓涨状。C 区域 (#29~#35 柱) 的结构形式与 A 区域相似，同样为单层双跨结构。该区域的破坏程度轻于 A 区域，如 #31 柱。在 C 区域，中柱下部发生剪切破坏，混凝土剥落，轴向钢筋被压曲外露，使上顶板下沉 5 cm 左右。

1.2 结构尺寸

大开地铁车站于 1962 年 8 月开始建造，施工方法为明挖法，并于 1964 年 1 月完工。车站结构和区间隧道均为典型的矩形单层双跨结构，其断面形式如图 2 所示。其中，车站结构跨度为 17 m，高度为 7.17 m。左右侧墙厚均为 0.7 m，顶板厚 0.8 m，底板厚 0.85 m，中柱截面为宽 0.4 m 长 1 m 的矩形截面，中柱间距 3.5 m；区间隧道结构跨度为 9 m，高度为 6.36 m。左右侧墙和顶板厚均为 0.4 m，底板厚 0.44 m，中柱截面为宽 0.4 m 长 0.6 m 的矩形截面，中柱间距 2.5 m。

大开车站和区间隧道中柱的截面配筋如图 3 所示，两者配筋率相当，分别为 6% 和 5.6%。阪神地震后，大开车站进行了修复和重建工作，中柱的结构形

式从原来的钢筋混凝土结构改为了现在的钢管混凝土结构。新建中柱是 3 个方形钢管混凝土柱组合而成，钢管截面的长宽均为 450 mm，厚为 12 mm。从图 3 中也可以看出，新建中柱的截面尺寸和配筋率均要大于原始大开车站结构。此外，单跨大开车站和区间隧道各构件的截面尺寸和截面配筋率如表 1 所示。

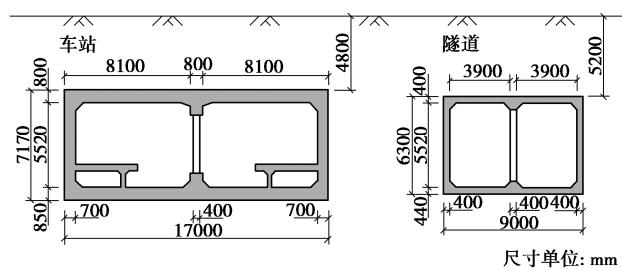


图 2 大开车站和区间隧道标准横断面

Fig. 2 Cross section of Daikai station and tunnel

表 1 构件截面尺寸及配筋

Table 1 Sectional sizes and reinforcement of components

位置	大开车站		区间隧道	
	单跨截面	配筋率/%	单跨截面	配筋率/%
侧墙	0.7 m×3.5 m	0.8	0.4 m×2.5 m	1.1
中柱	0.4 m×1.0 m	6.0	0.4 m×0.6 m	5.6
顶板	0.8 m×3.5 m	1.0	0.4 m×2.5 m	1.1
底板	0.85 m×3.5 m	1.0	0.4 m×2.5 m	1.1

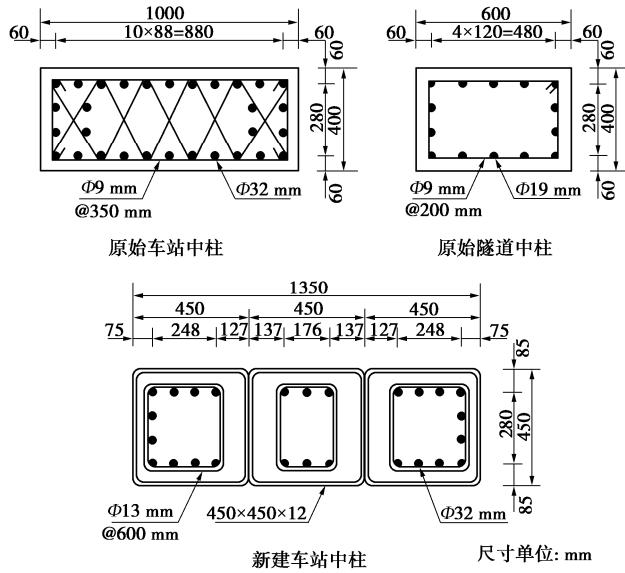


图3 原始中柱和新建中柱截面配筋

Fig. 3 Sectional reinforcement of original and new columns

2 中柱的拟静力推覆分析

2.1 分析方法

对于地面建筑而言, 当对构件进行推覆分析时, 往往先对其施加一定的竖向压力, 使其达到预定的轴压比, 后通过力控制或者位移控制对构件进行逐级加载, 直至构件发生破坏, 其加载模式如图 4 (a) 所示。然而, 这种加载模式不宜直接用于地下结构中柱的推覆分析。已有研究表明, 由于上覆土体和顶板的约束作用, 中柱顶部的转动自由度在很大程度上被约束。因此, 为真实反映地震过程中中柱的变形行为, 在中柱推覆过程中模型顶部也施加了转动约束, 其加载模式如图 4 (b) 所示。

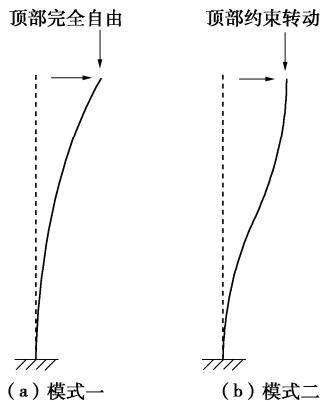


图4 中柱推覆分析模式

Fig. 4 Pushover modes of central columns

2.2 有限元模型与参数

原始中柱和新建中柱推覆分析的有限元模型分别如图 5 所示。在对中柱进行推覆分析时, 均选取的是

单跨结构尺寸, 即大开车站结构取 3.5 m, 区间隧道结构取 2.5 m。另外需要指出的是, 由于在本节的推覆过程中只关注中柱的损伤及破坏情况, 顶底板及顶底梁部分的混凝土采用的是弹性模型, 并且没有嵌入相应的钢筋网。中柱混凝土采用塑性损伤模型, 其材料特性如图 6 所示。此外, 钢筋采用理想弹塑性模型, 初始弹性模量取为 200 GPa, 屈服应力取为 235 MPa。大开车站震害调查资料显示^[5], 中柱所用混凝土设计强度为 23.52 MPa, 结构其他部分混凝土设计强度为 20.58 MPa。本文所选取的混凝土和钢筋材料参数的取值尽可能还原大开车站和区间隧道所采用的材料。钢筋笼按图 5 建模, 并嵌入混凝土中, 不考虑两者之间的黏结滑移。新建大开车站中柱的有限元模型中, 钢管和混凝土交界面位置共节点, 混凝土材料参数采用和原始大开车站中柱相同的模型参数, 方形钢管的材料参数采用同上述钢筋一致的模型参数。在大开车站和区间隧道中柱的推覆过程中, 模型底部固定, 顶部施加转动约束, 后施加竖向压力, 所施加的竖向压力值根据不同工况下中柱对应的轴压比进行确定。随后, 在模型顶部进行逐级水平位移加载。

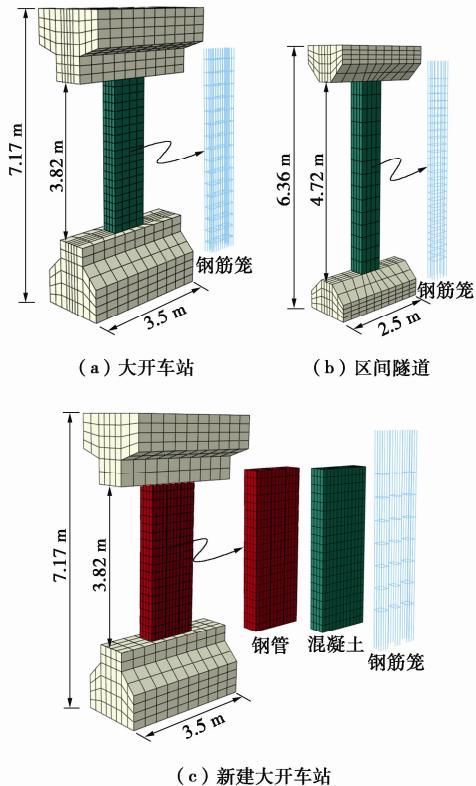


图5 中柱有限元模型

Fig. 5 Finite element models for central columns

2.3 分析结果

文献[15]采用动力时程分析方法和简化分析方法对大开车站进行了数值计算, 结果表明车站结构比隧

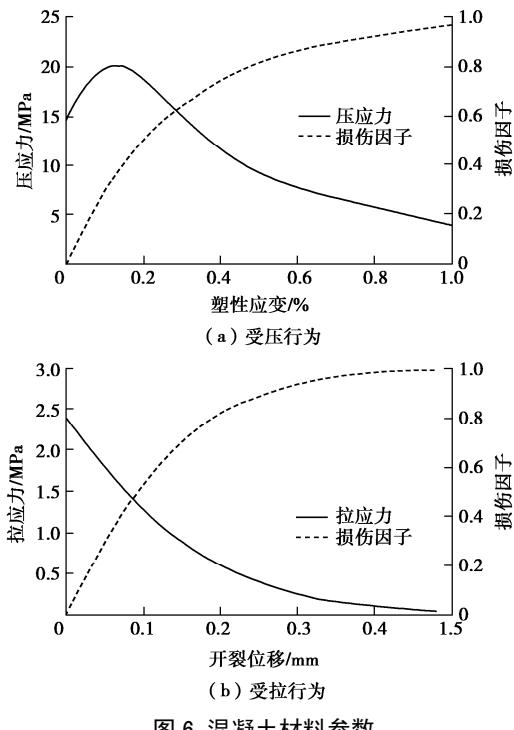


图 6 混凝土材料参数

Fig. 6 Material parameters of concrete

道结构的横向跨度和纵向跨度都要大，在重力作用下大开车站和区间隧道中柱的轴压比分别为 0.59, 0.36；考虑竖向地震动作用后，大开车站和区间隧道中柱的轴压比则分别增加至 1.05 和 0.63。因此，在对中柱进行水平推覆分析时，需在模型顶部施加适当的竖向压力，使中柱的轴压比为上述两个不同值。各个中柱推覆分析的水平力-位移曲线如图 7 所示，图 7 中 G 表示竖向荷载仅考虑重力作用，G+E 表示竖向荷载同时考虑重力和惯性力作用。由图 7 (a) 可以看出，原始大开车站中柱在轴压比为 0.59 和 1.05 情况下的力-位移曲线表现出明显的不同，在考虑竖向地震动所引起的上覆土体及结构自身惯性力时，峰值推力和极限位移（此处定义为峰值推力 85% 所对应的位移）都要明显低于中柱轴压比等于 0.59 的情况。对于轴压比等于 0.59 原始大开车站的中柱而言，当水平位移约为 46 mm 时，水平推力约达到峰值 580 kN，此时中柱的侧移率约为 1/147，此后水平推力并没有出现明显的下降趋势，而是表现出良好的延性性能。相比之下，当大开车站中柱的轴压比达到 1.05 时，当水平位移达到 37 mm 时，水平推力约达到峰值 528 kN，此时中柱侧移率约为 1/183，此后力-位移曲线出现明显的下降段，位移约在 55 mm，侧移率约为 1/123 时，水平推力降至峰值推力的 85% 左右，此时可认为中柱失效。

不同竖向压力作用下区间隧道中柱的力-位移曲线如图 7 (b) 所示，可以看出虽然考虑竖向地震动引起的惯性力作用，但区间隧道中柱轴压仅是由原来的

0.36 增加至 0.63。也就是说，考虑竖向惯性力后区间隧道中柱的轴压比和仅考虑重力时车站结构中柱的轴压比相当。因此，区间隧道中柱在轴压比为 0.36 和 0.63 情况下的力-位移曲线呈现的趋势基本一致，峰值推力过后两者均保持了很长一段的变形能力，表现出较好的延性性能。

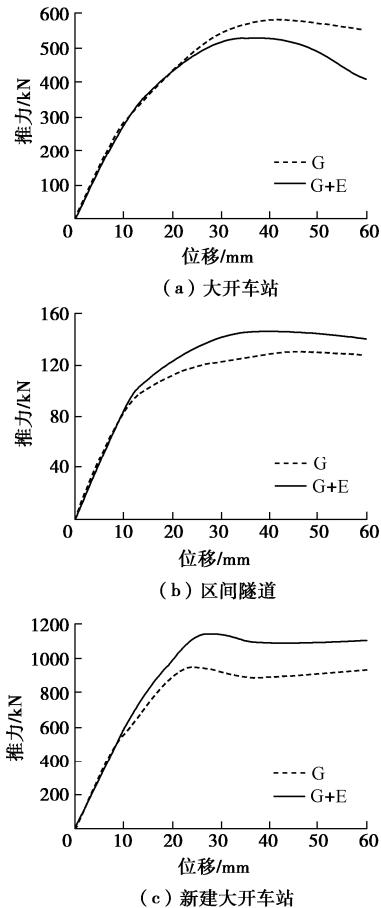


图 7 不同竖向压力下中柱推覆力-位移曲线

Fig. 7 Force-displacement curves of columns under different compression loads

不同竖向压力作用下新建大开车站中柱的力-位移曲线如图 7 (c) 所示，尽管在模型顶部施加了和原始大开车站中柱模型相同的竖向压力，但高轴压下的钢管混凝土柱并没有出现普通钢筋混凝土柱的破坏。在轴压比为 1.05 时，新建大开车站中柱所能承载的水平推力峰值为 1139.57 kN，约为相同轴压比下原始大开车站中柱所能承载的水平推力峰值的 2 倍，可见中柱采用钢管混凝土结构形式可以在很大程度上提升其抗剪承载力。在峰值推力过后，钢管混凝土柱仍能保持较好的抗侧力，力-位移曲线没有出现明显的下降趋势，这和低轴压下普通钢筋混凝土柱类似，可以认为其具有良好的延性性能。

进一步分析大开车站结构中柱可以发现，上覆土层的重力大部分由中柱承担，中柱在受力初始阶段轴

压比接近 0.6, 增加竖向地震动作用后轴压比高达 1.05。根据压弯截面的承载力曲线可知, 高轴压作用一方面降低了截面受弯承载力, 同时也降低了截面的塑性转动能力, 在截面弯矩达到受弯承载力后产生塑性铰, 之后承载力急剧下降, 直至构件破坏。总的来说, 通过对大开车站和区间隧道中柱进行推覆分析可以初步发现, 由于竖向地震动所引起的上覆土体及结构自身惯性力, 中柱的轴压比有明显的变大。原始大开车站的中柱在高轴压比出现了延性不足的脆性破坏, 对车站整体抗震性能产生不利的影响, 这可能是导致阪神地震中大开地铁车站塌毁破坏的主要原因之一。而区间隧道中柱和新建大开车站中柱在相应轴压作用下都没有出现延性不足的破坏, 而是在水平推力峰值过后仍保持了一定的抗侧力。正因为此, 区间隧道结构在地震过程中没有出现类似大开地铁车站的破坏现象。

3 土-结构体系的拟静力推覆分析

3.1 分析方法

在传统地下结构 Pushover 分析方法中, 土-结构体系在竖向只考虑了重力的作用, 然后对体系的水平向逐级施加惯性力直至结构发生破坏^[16]。上述研究表明, 钢筋混凝土柱在不同轴向压力作用下, 其抗震性能有明显差异。轴压比过高时, 普通钢筋混凝土柱可能出现变形能力不足的脆性破坏。因此, 在对土-结构体系进行拟静力推覆分析时, 竖向荷载不仅考虑了重力作用, 也同时考虑了竖向地震荷载, 这里称之为改进的 Pushover 分析方法。在改进的 Pushover 分析方法中, 通过对土-结构体系施加一定分布形式的水平与竖向惯性力, 分别模拟结构在水平与竖向地震荷载作用下的受力特点。考虑到结构自身惯性力作用对其地震反应的贡献较小, 在对土-结构体系进行推覆分析时, 只对土层施加了沿高度方向呈线性分布的惯性力。传统 Pushover 分析方法和改进 Pushover 分析方法的加载模型分别如图 8 中模式一和模式二所示, 其中模式一和模式二的水平荷载相同, 均是按倒三角分布形式逐级施加水平惯性力; 两种加载模式的主要区别是竖向荷载, 模式二的竖向荷载除了重力以外, 还包括竖向惯性力。杜修力等^[17]提出将中柱等效成一定宽度范围的土体, 对等效后的一维场地进行竖向地震反应分析, 可获得场地的竖向加速度分布。

3.2 有限元模型与参数

综合考虑计算效率以及边界约束条件对计算结果的影响, 本节开展的土-结构体系推覆分析有限元模型深度方向均取至基岩面, 即模型高度取 39.2 m; 在

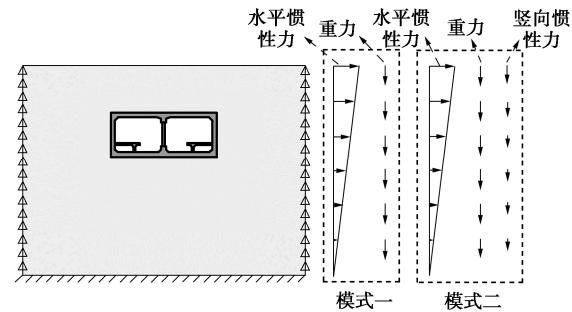


图 8 土-结构体系推覆分析模式

Fig. 8 Pushover modes of soil-structure system

车站纵向均取 5 跨结构宽度, 即大开车站模型取 17.5 m, 区间隧道模型取 12.5 m; 在车站横向均取结构跨度的 7 倍, 即大开车站模型取 119 m, 区间隧道模型取 63 m。图 9 为土体有限元模型横截面, 表 2 为土体材料参数。为了考虑土体剪切模量随剪应变增大而逐渐减小的特性, 在土-地下结构体系推覆过程中土体模型采用 Davidenkov 模型^[18], 其剪切模量比随剪应变的变化关系如下:

$$\frac{G}{G_{\max}} = 1 - \left[\frac{(\gamma / \gamma_0)^{2B}}{1 + (\gamma / \gamma_0)^{2B}} \right]^A, \quad (1)$$

式中, G 和 γ 分别为剪切模量和剪应变, G_{\max} 为土体最大剪切模量, A , B 和 γ_0 为与土性有关的拟合参数。

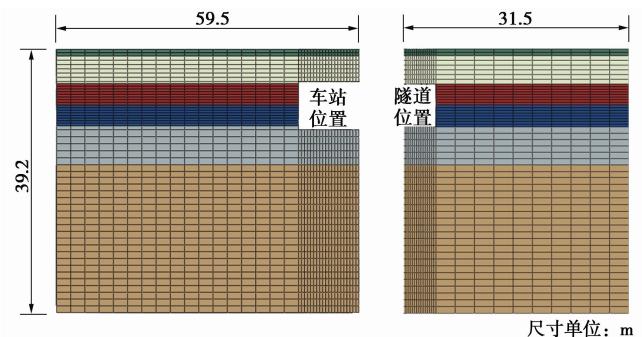


图 9 土体有限元模型横截面

Fig. 9 Cross section of finite element model of soil

表 2 土体材料参数

Table 2 Parameters of soils

土层	厚度 /m	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切波速 /(m·s ⁻¹)	泊松比	土类
土层一	1.0	1900	140	0.333	黏土
土层二	4.1	1900	140	0.488	砂土
土层三	3.2	1900	170	0.493	砂土
土层四	3.1	1900	190	0.494	黏土
土层五	5.8	1900	240	0.490	黏土
土层六	22.0	2000	330	0.487	砂土

由于推覆分析是拟静力过程, 数值计算中不涉及阻尼问题, 因此图 10 仅给出了不同类型土的剪切模量比随剪应变的变化曲线。图 11 为原始大开车站、原始区间隧道和新建大开车站的三维有限元模型。需要说

明的是，在结构的建模过程中难以严格还原实际大开车站和区间隧道的配筋情况，因此左右侧墙和顶底板均是参照表 1 所示的截面配筋率进行建模，并尽可能地接近实际情况。此外，中柱的有限元模型与 2.2 节完全一致，钢筋与混凝土的材料参数也与 2.2 节完全一致。

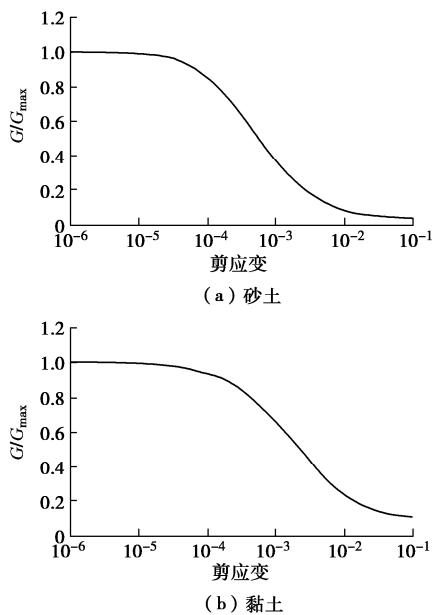


图 10 土体本构曲线

Fig. 10 Constitutive curves of soils

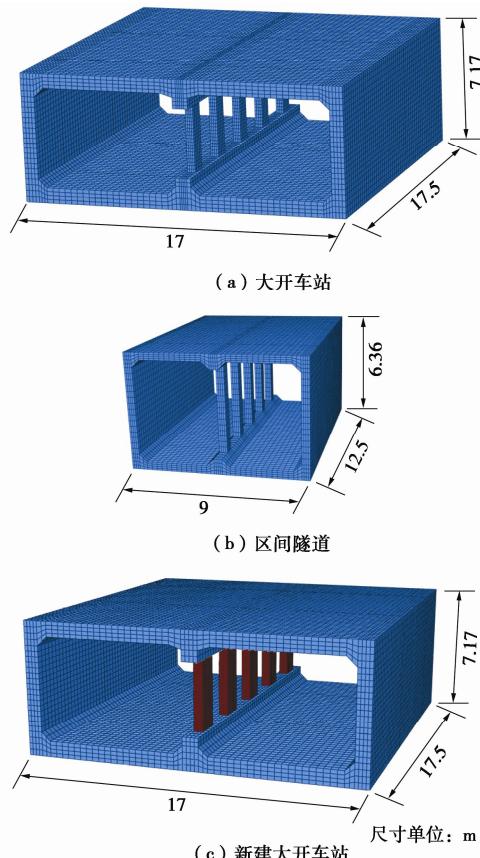


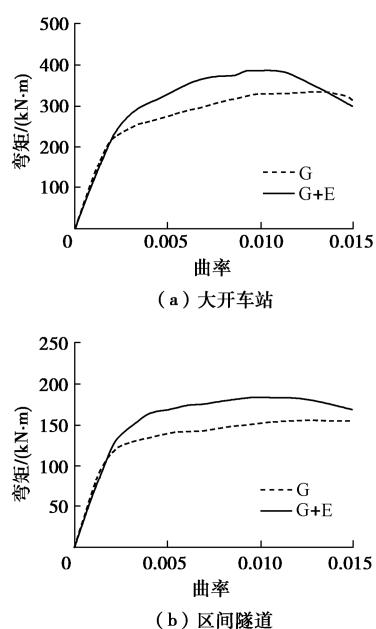
图 11 大开车站和区间隧道有限元模型

Fig. 11 Finite element models for Daikai station and tunnel

在不同部件接触方面，结构钢筋嵌入至结构混凝土内部，并且不考虑两者之间的黏结滑移；土-结构交界面位置设置摩擦接触，即法向允许土体与结构之间产生脱离，切线方向为摩擦系数等于 0.4 的滑动摩擦。在模型边界条件方面，模型底部固定，左右两侧的边界节点采用 MPC 耦合各个方向自由度，前后两侧边界约束出平面方向自由度。

3.3 分析结果

推覆过程中，不同结构中柱弯矩-侧移率变化曲线如图 12 所示。从图 12 (a) 可知，在竖向荷载仅考虑重力作用时，中柱底部截面的弯矩基本上一直随水平侧移率的增大而增大。在钢筋屈服之前，不同压力下的弯矩-侧移率曲线变化趋势一致，此后考虑竖向地震动的弯矩-侧移率曲线表现出较高的承载力，曲线峰值对应的弯矩值更大。然而，峰值弯矩过后，弯矩-侧移率曲线出现明显的下降段，侧移率约在 1/73 时弯矩值下降到峰值位置的 85%。此时结构的侧移率水平与庄海洋等^[19]和钟紫蓝等^[20]定义的地下结构弹塑性工作状态相吻合。弯矩-侧移率曲线的变化趋势均表明，考虑竖向地震动后中柱的变形能力有明显的不足。从图 12 (b) 可以看出，两种不同竖向压力下，区间隧道结构中柱的承载能力和变形能力相差不大，即使是考虑了竖向地震动的作用，也没有出现类似大开车站结构中柱的脆性破坏。图 12 (c) 为新建大开车站结构的推覆曲线，由于中柱采用了方形钢管混凝土组合结构，中柱的弯矩承载力有明显的提升。峰值承载力过后，弯矩-侧移率曲线能保持较高的承载力而不出现下降段，因此保证了新建大开车站结构的安全性能。



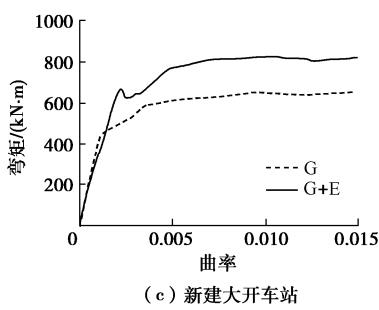


图 12 不同竖向压力下中柱弯矩 - 曲率曲线

Fig. 12 Bending moment-curvature curves of columns under different compression loads

综合中柱推覆分析和土 - 结构体系推覆分析来看, 两者可以得出相同的结论: 当竖向作用同时考虑重力和竖向地震动作用时, 中柱需要承担较大的竖向压力, 而此时中柱抗震性能受到严重影响, 虽然抗弯承载能力有所提升, 但变形能力出现较大幅度的减小, 对车站结构整体抗震性能不利。

图 13 为考虑竖向地震动作用引起的上覆土体惯性力时, 土 - 结构体系在推覆过程中混凝土的拉压损

伤。从图 13 中可以看出, 在第一阶段之前, 中柱的钢筋均处于弹性阶段, 中柱混凝土出现微小的压损伤, 顶板左右两跨跨中底部混凝土出现一定的拉损伤。在第一阶段至第二阶段过程中, 中柱的钢筋开始屈服, 中柱混凝土的拉压损伤进一步增大, 左右侧墙顶部混凝土也出现较大的拉损伤。在第二阶段至第三阶段过程中, 中柱混凝土的等效塑性应变达到 0.38%, 可以认为超过了混凝土的极限压应变, 此时中柱混凝土破坏。此后, 如果进一步对土 - 结构体系进行水平加载, 结构将出现图 13 (d) 所示的破坏现象, 中柱最终被完全压溃, 结构左右侧墙的顶部混凝土出现严重的拉压损伤, 顶板随即被压塌。

图 14 为实际震害情况与不同结构在不同竖向压力下最终推覆状态的对比。需要说明的是, 重力作用下的原始大开车站, 重力或重力和竖向惯性力作用下的新建大开车站由于结构没有出现严重的破坏, 土 - 结构体系仍可以进行水平推覆分析, 因此这里所述的最终推覆状态均是以原始大开车站结构在重力和竖向惯性力作用下倒塌时刻为依据, 也就是说, 图 14 所

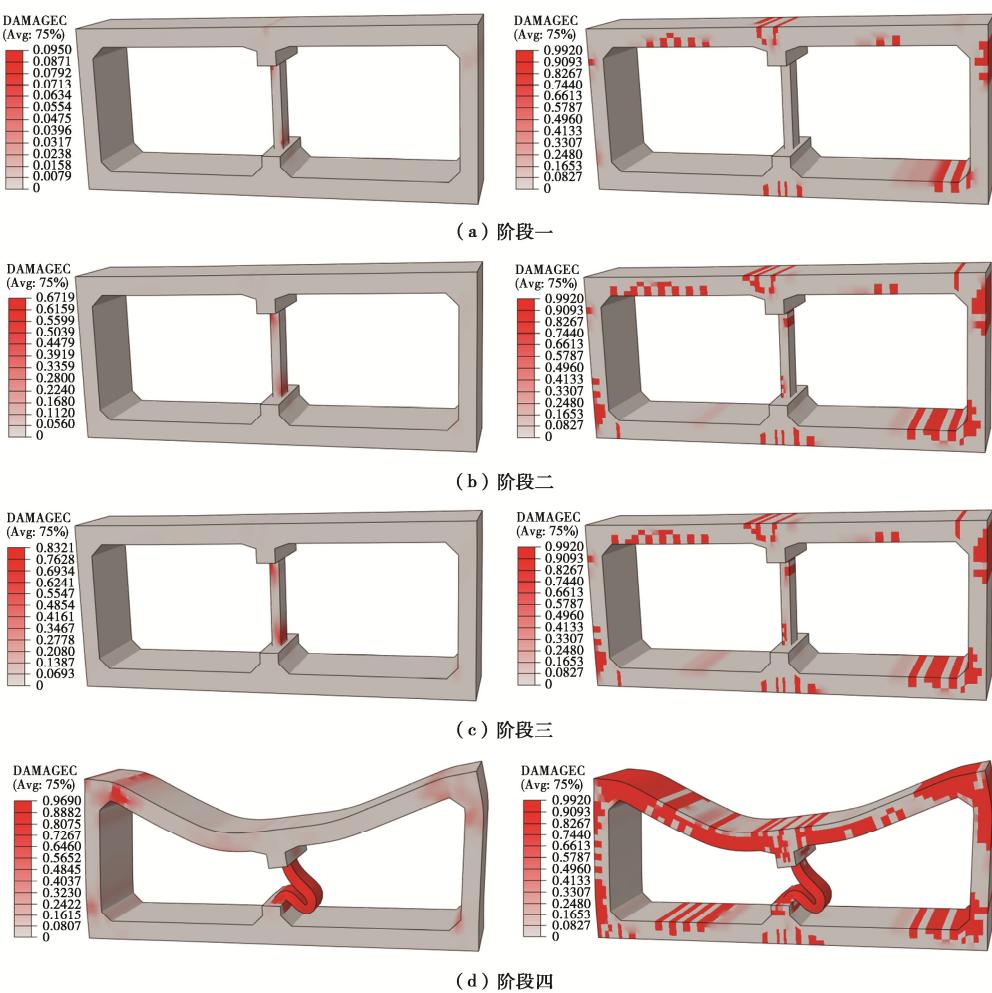


图 13 推覆过程中混凝土拉压损伤

Fig. 13 Compression and tension damages of concrete during pushover

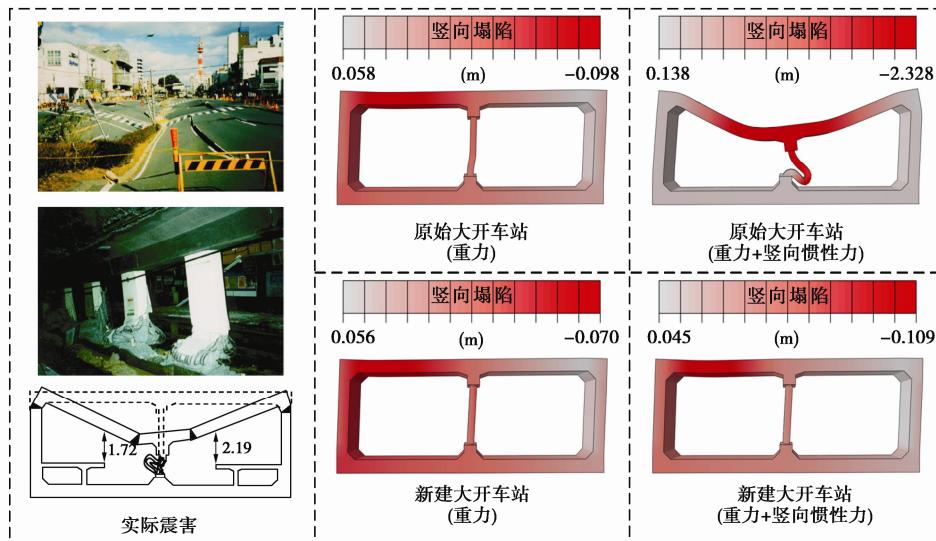


图 14 实际震害与数值模拟结果对比

Fig. 14 Comparison between actual seismic damages and numerical simulation results

列举的数值模拟工况在水平方向所施加的惯性力是完全一致的。从中可以看出，当竖向荷载同时考虑重力和竖向惯性力作用时，普通钢筋混凝土大开车站结构出现和实际震害相似的破坏状态，而中柱采用钢管混凝土结构则可以有效避免这种破坏模式。

4 结 论

本文以阪神地震中出现的大开车站和区间隧道结构的地震损伤为背景，分别从构件层面和结构层面开展了拟静力推覆分析，得到以下 3 点结论。

(1) 考虑竖向地震动作用后，大开车站中柱的轴压比有大幅提升，构件和结构层面推覆过程所获得的中柱性能曲线均表现出脆性破坏，即高轴压比下普通钢筋混凝土中柱的变形能力不足，并最终引起了结构的整体塌毁破坏。

(2) 相比之下，区间隧道结构横向和纵向的跨度都要远小于大开车站结构，即使在考虑竖向地震动作用的情况下，区间隧道结构的中柱轴力也不大，其在水平荷载作用下仍表现出较好的延性性能，故没有引起区间隧道结构的严重破坏。

(3) 新建的大开车站中柱采用钢管混凝土结构，即使在较高的轴压比情况下，钢管混凝土柱都表现出较高的承载力和延性性能，相同地震荷载工况下没有出现原始结构的塌毁破坏，极大地提高了车站结构的安全性能。

参考文献：

- [1] NAKAMURA S, YOSHIDA N, IWATATE T. Damage to Daikai subway station during the 1995 Hyogoken-Nambu

earthquake and its investigation[J]. Japan Society of Civil Engineers, Committee of Earthquake Engineering, 1996: 287 – 295.

- [2] ELNASHAI A S. Analysis of the damage potential of the Kocaeli (Turkey) earthquake of 17 August 1999[J]. Engineering Structures, 2000, **22**(7): 746 – 754.
- [3] 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 – 150.
- [4] LI T B. Damage to mountain tunnels related to the Wenchuan earthquake and some suggestions for aseismic tunnel construction[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, **71**(2): 297 – 308.
- [5] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. Soils and Foundations, 1996, **36**: 283 – 300.
- [6] IWATATE T, KOBAYASHI Y, KUSU H, et al. Investigation and shaking table tests of subway structures of the Hyogoken-Nanbu earthquake[C]// Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000, Auckland.
- [7] 矢的照夫, 梅原俊夫, 青木一二三, 等. 兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析[J]. 土木学会論文集, 1996(537): 303 – 320. (YAMATO T, UMEHARA T, AOKI H, et al. Damge to Daikai subway station of Kobe rapid transit system and estimation of its reason during the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake[J].)

- Journal of JSCE, 1996(537): 303 - 320. (in Japanese))
- [8] AN X H, SHAWKY A A, MAEKAWA K. The collapse mechanism of a subway station during the Great Hanshin earthquake[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, **19**(3): 241 - 257.
- [9] HUO H. Seismic Design and Analysis of Rectangular Underground Structures[D]. West Lafayette: Purdue University, 2005.
- [10] 庄海洋, 程绍革, 陈国兴. 阪神地震中大开地铁车站震害机制数值仿真分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 245 - 250. (ZHUANG Hai-yang, CHENG Shao-ge, CHEN Guo-xing. Numerical simulation and analysis of earthquake damages of Dakai metro station caused by Kobe earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 245 - 250. (in Chinese))
- [11] LIU J, LIU X. Pushover analysis of Daikai subway station during the Osaka-Kobe earthquake in 1995[C]// The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008, Beijing: 12 - 17.
- [12] 刘祥庆. 地铁地下结构地震反应分析方法与实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2008. (LIU Xiang-qing. Research on Analysis Method and Experimental Study of Seismic Response of Underground Subway Structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))
- [13] 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 - 62, 69. (DU Xiu-li, MA Chao, LU De-chun, 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 - 62, 69. (in Chinese))
- [14] XU C S, ZHANG Z H, LI Y, et al. Validation of a numerical model based on dynamic centrifuge tests and studies on the earthquake damage mechanism of underground frame structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **104**: 103538.
- [15] 许紫刚. 地铁地下结构横断面抗震分析方法研究与减震技术初探[D]. 北京: 北京工业大学, 2020. (XU Zi-gang. Research on Seismic Analysis Methods and Preliminary Study on Seismic Control Technologies of Subway Underground Structures in Transverse Cross Section[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [16] LIU J B, WANG W H, DASGUPTA G. Pushover analysis of underground structures: method and application[J]. Science China Technological Sciences, 2014, **57**(2): 423 - 437.
- [17] 杜修力, 许紫刚, 许成顺, 等. 浅埋地下结构地震反应分析的惯性力 - 位移法[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(4): 583 - 591. (DU Xiu-li, XU Zi-gang, XU Cheng-shun, et al. Inertia force-displacement method for seismic analysis of shallow buried underground structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(4): 583 - 591. (in Chinese))
- [18] 庄海洋. 土 - 地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006. (ZHUANG Hai-yang. Study on Nonlinear Dynamic Soil-Underground Structure Interaction and Its Large-Size Shaking Table Test[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [19] 庄海洋, 任佳伟, 王瑞, 等. 两层三跨框架式地铁地下车站结构弹塑性工作状态与抗震性能水平研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 131 - 138. (ZHUANG Hai-yang, REN Jia-wei, WANG Rui, et al. Elasto-plastic working states and seismic performance levels of frame-type subway underground station with two layers and three spans[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 131 - 138. (in Chinese))
- [20] 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 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))