

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231218004

基于不同分析方法的设置分体柱地铁车站结构 抗震性能研究*

许紫刚^{1,2}, 郑养宁^{1,2}, 庄海洋^{1,2}, 张季^{1,2}, 韩润波³

(1. 华东交通大学交通基础设施安全江西省重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 3. 赤峰学院资源环境与建筑工程学院, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要: 在水平和竖向双向地震作用下, 浅埋地铁车站结构中柱易出现轴压比大、水平变形能力不足等特点。钢筋混凝土分体柱因其其在高轴压作用下仍具有较好的延性性能, 不仅在地面高层建筑结构中得到广泛的应用, 也逐渐在地下车站结构减震设计中受到关注。采用科学合理的数值模型和分析方法对设置分体柱地铁车站结构进行抗震性能评价是其中一个关键问题。本研究以某设置分体柱的单层双跨地铁车站结构为例, 分别建立了动力时程分析方法、反应加速度法和Pushover分析方法的三维和二维有限元分析模型, 通过层间位移角评价了该设置分体柱地铁车站结构的抗震性能, 并对比了不同分析方法在计算中柱变形和关键截面内力等方面的计算精度。结果表明: 采用不同分析方法所计算的车站结构在不同地震作用下层间位移角远小于现行规范中1/550的规定, 满足工程设计要求; 折减分体柱中单元柱的弹性模量和密度、单元柱之间的摩擦系数保持不变, 是建立带分体柱地铁车站结构二维分析模型的有效方法; 综合考虑计算成本与计算效率, 二维Pushover分析方法可获得与三维动力时程分析方法相近的计算结果, 推荐在工程设计中使用。

关键词: 地铁车站; 分体柱; 反应加速度法; Pushover分析方法; 抗震性能

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1359-09

Study on the Seismic Performance of Subway Station Structures with Split Columns Based on Different Analysis Methods

XU Zigang^{1,2}, ZHENG Yangning^{1,2}, ZHUANG Haiyang^{1,2}, ZHANG Ji^{1,2}, HAN Runbo³

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Transportation Infrastructure Safety, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Resources, Environment and Architectural Engineering, Chifeng University, Chifeng 024000, China)

Abstract: The central columns in shallow buried subway station structures are prone to high axial compression ratios and insufficient horizontal deformation capacity when subjected to horizontal and vertical seismic loads. Due to their good ductility under high axial compression, reinforced concrete split columns are widely used in high-rise building structures and are also gaining attention in the

* 收稿日期:2023-12-18;修回日期:2024-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108453)、江西省自然科学基金项目(20212BAB214014, 20232BAB204084)、中国博士后科学基金项目(2023M741159)、中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2023D49)、内蒙古自然科学基金青年基金项目(2023QN05012)资助

作者简介: 许紫刚(1992—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事地下结构抗震研究。E-mail:xuzigang1027@163.com

seismic design of underground station structures. The use of scientific and reasonable numerical models and analysis methods to evaluate the seismic performance of subway station structures with split columns has become one of the key issues. This study used a single-story double-span subway station structure with split columns as an example and established three-dimensional (3D) and two-dimensional (2D) finite element analysis models using dynamic time-history analysis method, response acceleration method, and Pushover analysis method. The seismic performance was evaluated through inter-story drift angles, and the calculation precision of different analysis methods in calculating column deformation and key section internal forces was compared. The results showed that the inter-story drift angle of the station structure was much smaller than the current criterion of 1/550 when using different analysis methods under different earthquake loads, which met the engineering design requirements; Reducing the elastic modulus and density of the unit columns in the split columns, or keeping the friction coefficient between the unit columns unchanged, was an effective method for establishing a 2D analysis model of subway station structures with split columns. Taking into account both computational cost and efficiency, the 2D Pushover analysis method can obtain similar calculation results to the 3D dynamic time-history analysis method, and is recommended for use in engineering design.

Keywords: subway station, split column, response acceleration method, Pushover analysis method, seismic performance

0 引言

1995年阪神地震造成的大开地铁车站完全塌毁破坏使得世界范围内学者和工程师们开始广泛关注地下结构抗震问题^[1]。常见的地下结构抗震研究手段主要包括原型观测、模型试验和数值分析等,目前地下结构抗震研究工作已取得阶段性进展^[2-5]。例如在大开车站地震破坏机理研究方面,C. Xu等^[6]和Z. Zhang等^[7]提出在结构顶面的上覆土中掺入一定比例钢砂来模拟上覆土的竖向惯性效应的试验方法,通过离心机振动台开展了浅埋地下框架结构地震破坏模型试验研究,揭示了不同上覆土压力对浅埋地下框架结构地震破坏反应的影响规律。杜修力等^[8-9]采用ABAQUS软件从地震动作用方式、结构埋深和土体与结构的相对刚度等角度出发,研究了大开车站的地震反应规律,认为水平和竖向地震动联合作用是引起大开车站结构整体塌毁破坏的主要因素。许紫刚等^[10]采用拟静力推覆分析方法对比了大开车站和区间隧道结构在有无竖向地震荷载时抗震性能的差异,认为中柱变形能力不足的脆性破坏是车站倒塌的关键。

为了减轻和防御地下结构在地震过程中的破

坏,传统的抗震设计一般是加强结构自身强度。随着减隔震技术的日趋成熟,总结目前有关地下结构减隔震研究现状可以发现,地下结构减震控制技术主要分为两类:一类是在地下结构周边设置减震材料^[11-12];另一类是设置附属装置保护关键构件^[13-15]。分体柱应用于地铁车站结构是一种全新的地下结构减震体系,许成顺等^[16]、许紫刚等^[17]分别采用三维整体动力时程分析方法和三维Pushover分析方法研究了设置分体柱地铁车站结构的抗震性能,但整体而言呈现计算成本高、计算效率低的特点。殷琳等^[18]探讨了传统地铁车站结构二维和三维模型的差异,并给出了二维模型里中柱力学参数的取值建议。分体柱与传统柱在构造上存在区别,这一建模方法是否同样适用设置分体柱地铁车站结构需进一步研究。

本文以某设置分体柱的单层双跨地铁车站结构为例,分别建立了动力时程分析方法、反应加速度法和Pushover分析方法的三维和二维有限元分析模型,通过层间位移角评价了该设置分体柱地铁车站结构的抗震性能,并对比了不同分析方法在计算中柱变形和关键截面内力等方面的计算精度,并给出建立设置分体柱地铁车站结构二维有限元分析模型的合理建议。

1 分析方法简介

1.1 反应加速度法

反应加速度法是《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)^[19]和《地下结构抗震设计标准》(GB/T 51336—2018)^[20]推荐采用的地下结构抗震简化分析方法。反应加速度法与反应位移法不同,其通过建立土-地下结构整体分析模型来考虑土与地下结构之间的相互作用,并认为土层惯性力是地下结构在地震作用下受到的主要荷载,其计算模型如图1所示。当采用反应加速度法对地下结构进行抗震分析时,一般先进行一维土层地震反应计算,选取地下结构顶底板位置发生最大相对位移时刻作为地下结构的最不利时刻,将此时随土层深度分布的水平向加速度值以体力的方式施加到有限元模型上。

为了反映土体惯性力和阻尼力的共同作用,可采用土体单元的变形来计算有效反应加速度,通过式(1)中的应力项计算有效反应加速度:

$$a_i = \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{\rho_i h_i} \quad (1)$$

式中, a_i 为第 i 层土体单元的有效反应加速度; ρ_i 为第 i 层土体单元的密度; h_i 为第 i 层土体单元的厚度。此外,刘如山等^[21]和董正方等^[22]对反应加速度法中的地震动参数进行了修正,提高了计算精度。

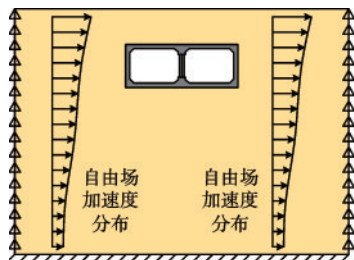


图1 反应加速度法计算模型

Fig.1 Calculation model of response acceleration method

1.2 Pushover 分析方法

在对土-结构系统进行Pushover分析时,需要同时建立土-结构相互作用分析模型和附加自由场模型,如图2所示。考虑在整个计算模型中施加单调递增的水平惯性体积力,这一点可以通过对各土层

和地下结构按照其所在的深度位置施加相应的单调递增水平等效惯性加速度来实现,并通过附加自由场模型的变形来控制地震动输入强度。地下结构Pushover分析方法的另一个关键点是确定水平等效惯性加速度分布形式,目前主要有三种^[23]: (1)直接采用在输入地震动作用下,自由场各土层有限元模型节点的绝对峰值加速度分布;(2)同反应加速度法一致,考虑土体处于最大剪应变状态时,通过式(1)计算有效水平加速度分布;(3)考虑地下结构在地震动作用下以一阶振型为主,同时借鉴地上结构抗震设计的思想,采用倒三角水平加速度分布形式。

当采用Pushover分析方法对地下结构进行抗震分析时,需要同时对土-结构相互作用分析模型和附加自由场模型逐级施加具有一定分布形式的水平荷载,一直到附加自由场模型达到所要求的目标位移,并将此时结构的反应作为地震作用下结构的反应。

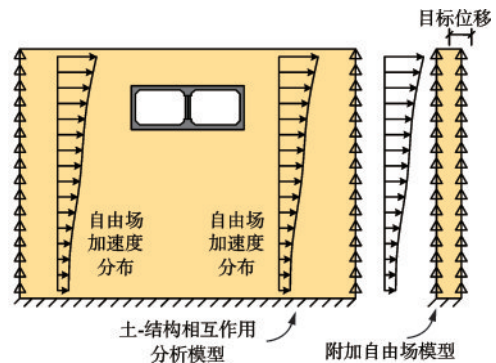


图2 Pushover分析方法计算模型

Fig.2 Calculation model of Pushover analysis method

1.3 动力时程分析方法

地震动输入是动力时程分析方法的关键问题之一,目前地震动输入方式主要可以分为波动法和振动法。将场地看作开放的半无限空间时,地震动能量由下部基岩向上传播至地表后,又反射回下部基岩,这是一种波在介质中传播的波动效应,一般应该应用波动理论。波动法考虑了波在介质中的传播效应,将散射问题转化为波的传播问题,也就是将地震波转化为一组等效荷载作用在人工边界的各个节点上,以此实现地震动输入。振动法忽略了波在介质中的传播效应,将基岩运动产生的加

速度以惯性力形式直接加在基岩上部土体和结构各个节点。不同的场地和不同的研究问题需要采取不同的地震动输入方式。当场地为下卧刚性基岩条件时,地震动能量由基岩向上传递到上覆土层中后,地震波将在土层中来回反射形成驻波,这样能量在竖向为非开放,应视为一个振动问题,采用振动法则更为合适。

针对不同的场地条件应选取更合适的分析方法,如下卧刚性基岩,上覆沉积土的场地,地震动的能量由基岩上传至上覆土,引起上覆土层的振动,此时采用振动输入方法更为合适,其计算模型如图3所示。而目前许多采用振动法进行的工作在人工边界处并未考虑自由场边界效应,本文计算模型采用的是杜修力等^[24]提出的下卧刚性基岩条件下考虑自由场边界效应的振动输入方法。 f_x 和 f_y 为反映自由场边界效应的等效节点力,其计算方法可参考文献[24]。边界上切向和法向的刚度和阻尼可分别按下式计算:

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{r}, C_{BT} = \rho c_s \quad (2)$$

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{r}, C_{BN} = \rho c_p \quad (3)$$

式中, r 是波源与人工边界之间的距离; c_s 和 c_p 分别是剪切波和压缩波的波速; G 是土体的剪切模量; ρ 是土体的密度; α_T 和 α_N 分别为切向和法向黏弹性人工边界参数。

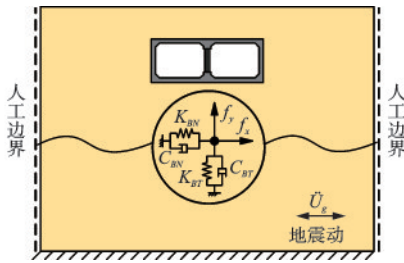


图3 动力时程分析方法计算模型

Fig.3 Calculation model of dynamic time-history analysis method

2 实例分析

2.1 工程概况

矩形框架钢筋混凝土结构是地下结构中最常见的结构形式,本节以某典型单层双跨矩形框架

地下车站结构作为研究对象。该地下结构的横断面尺寸和中柱尺寸如图4所示,场地土层表面至结构顶面的垂直距离为4 m。车站结构外轮廓尺寸为22 m×8.5 m,顶板及左右侧墙厚度均为0.8 m,底板厚度为0.9 m。结构跨中设有矩形截面中柱,中柱的截面尺寸为1.5 m×0.9 m,且中柱在车站结构纵向为等间距分布,相邻中柱轴线间距为8 m。参考许成顺等^[16]对分体柱的研究,将中柱设置为沿车站横向的二分柱,分隔后每个单元柱的截面尺寸为1.5 m×0.45 m。需要说明的是,分体柱各个单元柱之间一般设置分隔板,在外荷载作用下分隔板和单元柱之间存在粘结—滑移—失效的过程。为简化计算模型,这里仅认为单元柱之间存在摩擦接触,并将摩擦系数取为0.8^[17]。结构顶底板、左右侧墙和中柱的材料均选用C40型号混凝土。由于本研究讨论弹性条件下地下结构的地震反应特征和规律,故结构采用弹性模型且不考虑钢筋的作用。

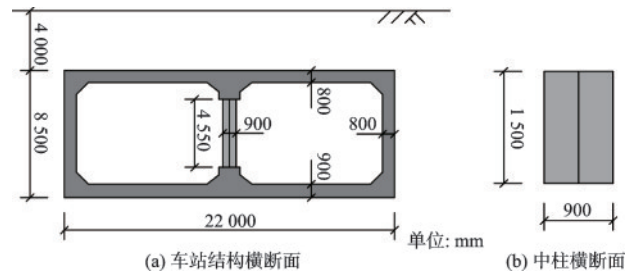


图4 车站结构尺寸示意

Fig.4 Dimensional drawing of station structure

场地土层共分为6层,土层表面至基岩面的垂直距离为40 m。各土层性质见表1,通过试验获取各类土的剪切模量比和阻尼比随剪应变的变化曲线,并采用Davidenkov本构模型进行模拟^[25]。为综合考虑不同频谱成分地震动对地下结构地震反应的影响,

表1 土层物理性质

Table 1 Physical properties of the soil layer

序号	土性	厚度/ m	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	剪切波速/ (m·s ⁻¹)
1	素填土	2	1 840	0.33	140
2	粉细砂	5	2 010	0.32	170
3	黏土	7	1 940	0.35	216
4	粉质黏土	4	1 890	0.31	240
5	砂土	10	2 020	0.34	304
6	老黏土	12	1 960	0.35	485

本算例中输入的地震动记录主要包括El-Centro地震动、Kobe地震动和Manjil地震动等3条地震动记录,3条地震动记录的加速度时程曲线如图5所示。

如前文所述,本研究主要考虑小震情况下地下结构的弹性反应,因此在数值模拟过程中,将三条地震动记录的峰值加速度均调整为0.1g。

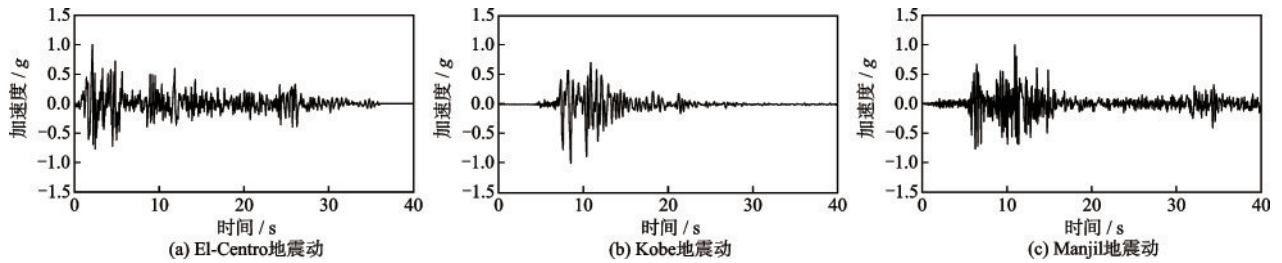


图5 加速度时程曲线

Fig.5 Time-history curves of acceleration

2.2 有限元模型

土-地下结构整体动力时程分析三维有限元模型如图6所示,模型总高度取为40 m,模型总宽度取为结构宽度的7倍,即154 m。沿车站纵向,选取3跨进行建模,即24 m。模型顶部为自由面,底部为固定边界,左右两侧边界设置考虑自由场效应的粘弹性人工边界条件,前后两侧面限制其出平面方向的自由度。采用ABAQUS有限元软件进行三维数值建模,建模时结构和土体均选用八节点一次线性六面体单元(C3D8R)进行离散,并且满足单元尺寸小于1/8~1/10最小波长的要求。土体和结构之间设置摩尔库伦摩擦接触,其中法线方向允许结构与土体之间产生分离,切线方向设置摩擦系数0.4。

本研究同时建立了土-地下结构整体动力时程分析二维有限元模型,以探究采用二维模型分析带

分体柱地铁车站结构抗震性能的可行性。在二维有限元模型中,其网格划分与三维有限元模型在横断面方向完全一致,限于篇幅,这里不再单独展示二维有限元模型。区别仅体现在分体柱的参数选取,考虑到中柱在车站纵向是等间距分布,当建立二维分析模型时,弹性模量和密度等需进行折减,折减系数定义如下:

$$\alpha = \frac{l}{L} \quad (4)$$

式中, l 为中柱沿车站纵向的长度,本算例中为1.5 m; L 为相邻中柱轴线沿车站纵向的间距,本算例中为8 m。换算前后的弹性模量分别为32.50、6.09 GPa,换算前后的密度分别为2 500.00、468.75 kg/m³。

与传统钢筋混凝土中柱不同,分体柱建模时需要考虑单元柱之间的摩擦接触,考虑到摩擦系数是无量纲的量,因此在二维分析模型中对分体柱的摩擦系数不进行折减。

2.3 场地地震反应分析

在采用反应加速度法或Pushover分析方法对车站结构进行抗震分析前,需首先完成自由场的地震反应分析。通过一维场地反应分析获得结构顶底板位置处土层水平相对位移时程曲线如图7所示,三条地震动记录所对应的最大土层水平相对位移分别是-3.350、3.259、2.418 mm。图8进一步展示了水平相对位移达到峰值时刻时场地水平加速分布模式。由图7和图8可以看出,在El-Centro地震动作用下,结构顶底板位置处土层水平相对位移达到峰值时,场地呈现“左摆”的现象,其余两条地震动作用下,场地呈现“右摆”的现象。

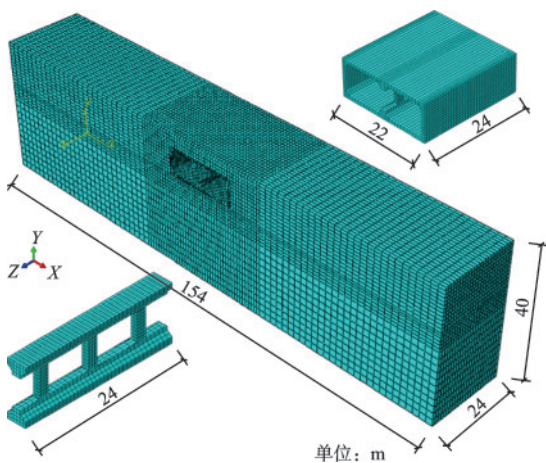


图6 土-地下结构体系三维有限元网格

Fig.6 Three-dimensional finite element mesh of soil-underground structure system (unit: m)

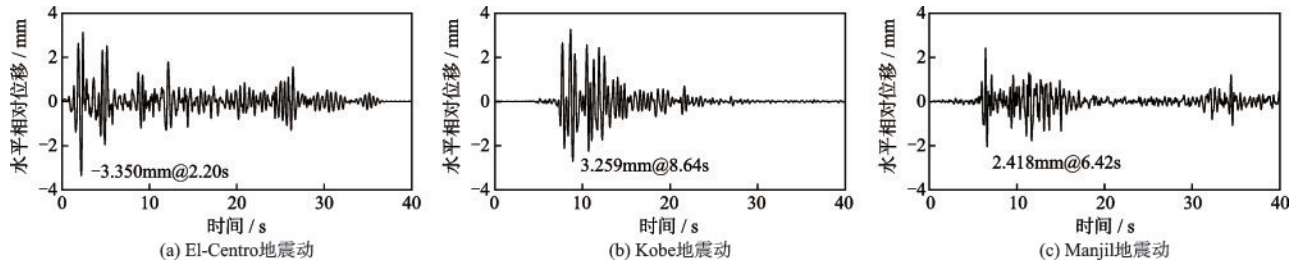


图7 结构顶底板位置处土层水平相对位移时程

Fig.7 Horizontal relative displacement time-history of soil layer at the top and bottom plate of the structure

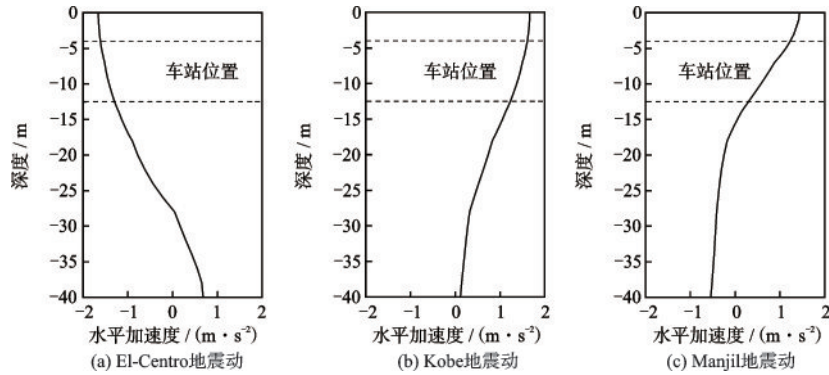


图8 加速度分布

Fig.8 Acceleration distribution

2.4 结构动力响应对比

地下结构层间相对变形是衡量地下结构抗震安全性能的一个重要指标。本节选取图9所示的中柱顶部A和底部B两点的水平相对位移进行对比分析,此外,还选取了4个典型截面,包括中柱CC、侧墙LW、顶板TS和底板BS,对比其轴力、剪力和弯矩等。需要说明的是,在三维动力时程分析时,仅选取中间一跨进行对比研究,目的是消除前后两侧的边界效应的影响,因此,三维动力时程分析所得到的中间一跨的地震响应也可认为是相对准确的响应值。这里定义其他分析方法与三维动力时程分析方法之间的误差计算如下:

$$R = \frac{F_x - F_{DTHAM-3D}}{F_{DTHAM-3D}} \times 100\% \quad (5)$$

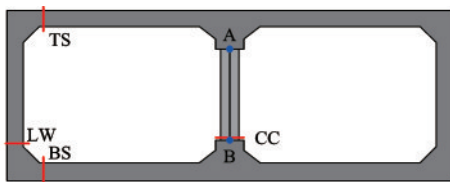


图9 车站结构截面选取示意

Fig.9 Schematic of selected cross-section of the station structure

式中, $F_{DTHAM-3D}$ 表示采用三维动力时程分析方法所计算的截面内力或变形值; F_x 表示采用某分析方法所计算的截面内力或变形值,包括二维动力时程分析方法、三维反应加速度法、二维反应加速度法、三维 Pushover 分析方法和二维 Pushover 分析方法。

图10为三条地震动作用下三维动力时程分析和二维动力时程分析获得的中柱顶底部的水平相对位移时程曲线,其中DTHAM-3D表示三维动力时程分析方法,DTHAM-2D表示二维动力时程分析方法。从图中可以看出,对于同一地震动作用而言,两种方法所得到的时程曲线无论是峰值大小还是变化趋势均吻合较好,表明二维模型中分体柱建模方法是有效的,即折减单元柱的弹性模量和密度,单元柱之间的摩擦系数保持不变。

图11和表2进一步给出了不同地震工况下,不同分析方法所计算出的中柱最大相对位移和最大层间位移角。其中RAM-3D和PAM-3D表示三维反应加速度法和三维 Pushover 分析方法,RAM-2D和PAM-2D表示二维反应加速度法和二维 Pushover 分析方法。由图11可知,同一地震作用下,三维反应加速度法和二维反应加速度法计算的中柱变形基本一致,三维 Pushover 分析方法和二维 Pushover 分析方法计算的中柱变形也基本相当,这也进一步说明二维模型中分体柱建模方法的有效性。总体而言,反

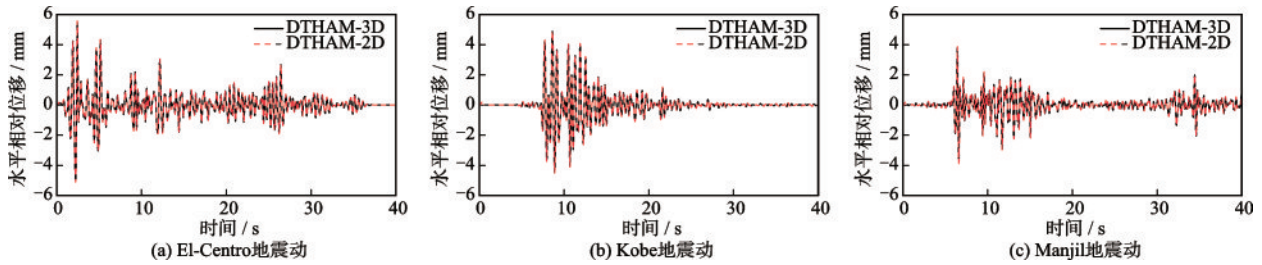


图10 三维动力时程分析与二维动力时程分析对比

Fig.10 Comparison between 3D and 2D dynamic time-history analysis

应加速度法将场地地震反应分析获得的加速度分布按不同高度位置直接施加到土-结构相互作用模型中,计算结果与动力时程分析方法相比较有一定差异。当引入附加自由场模型的变形来控制地震动输入强度,即采用Pushover分析方法时,中柱的水平变形与动力时程分析方法更为接近,计算精度有明显提升。表2将中柱的水平相对位移换算为层间位移角,通过比较可以发现不同分析方法所确定的中柱层间位移角均满足小于1/550的要求。

表2 中柱层间位移角

Table 2 Inter-story drift angles of central column

地震动	分析方法	位移角	分析方法	位移角
El-Centro	DHATM-3D	1/897	DHATM-2D	1/890
	RAM-3D	1/1 076	RAM-2D	1/1 069
	PAM-3D	1/926	PAM-2D	1/919
Kobe	DHATM-3D	1/935	DHATM-2D	1/929
	RAM-3D	1/1 082	RAM-2D	1/1 074
	PAM-3D	1/964	PAM-2D	1/957
Manjil	DHATM-3D	1/1 220	DHATM-2D	1/1 211
	RAM-3D	1/1 492	RAM-2D	1/1 481
	PAM-3D	1/1 255	PAM-2D	1/1 246

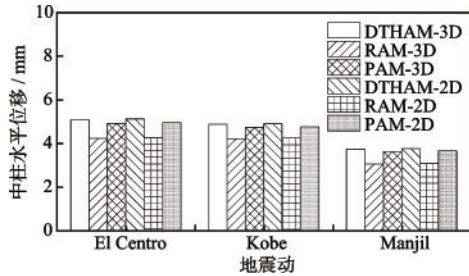


图11 中柱水平相对变形

Fig.11 Horizontal relative deformation of central column

图12给出了图9选取的4个典型截面的内力误差分析。需要说明的是,三维模型中截面内力分析是选取了中间一跨,即8 m;而二维模型是采用了平面应变单元,截面内力可以认为是单位长度上的内力值。当将二者进行比较时,需要将二维模型所得的计算结果乘以单跨车站的长度。观察二维动力时程分析方法与三维动力时程分析方法的计算结

果可以发现,三条地震工况下中柱底部截面(CC截面)的剪力和弯矩值都有较高的计算精度,仅中柱底部的轴力计算误差略大,但均在10%以内,这进一步表明二维模型中分体柱建模方法的合理性和有效性。此外,同中柱变形展示出的规律基本一致,三维反应加速度法和二维反应加速度法在截面内力方面也和三维动力时程分析方法存在一定差异,最大误差达到20%。总体而言,采用三维Pushover分析方法和二维Pushover分析方法所计算的典型截面内力均与三维动力时程分析方法计算结果保持一致,全部计算误差控制在10%以内。从计算效率和计算成本考虑,采用二维Pushover分析方法即可获得满足工程设计所需的计算结果。

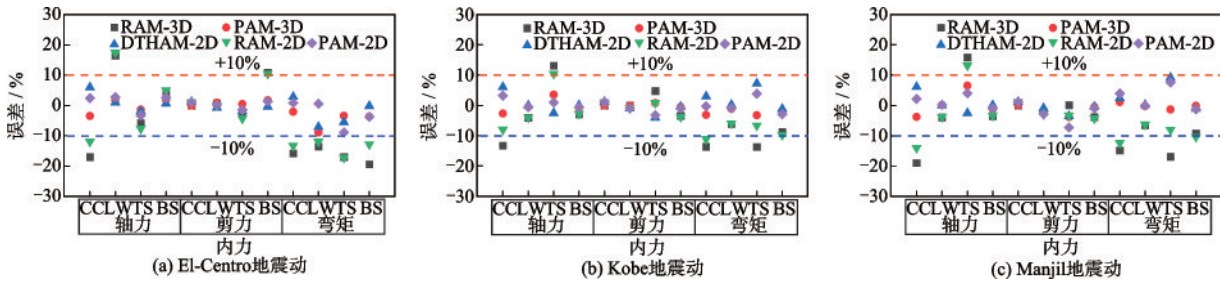


图12 不同分析方法计算精度对比

Fig.12 Comparison of calculation precision of different analysis methods

3 结 论

采用动力时程分析方法、反应加速度法和 Pushover 分析方法,并分别建立了三维和二维土—地下结构整体分析有限元模型,研究了带分体柱地铁车站结构的抗震性能,主要得出以下结论:

(1) 采用不同分析方法所计算的车站结构在不同地震作用下层间位移角在 1/1491 和 1/890 之间,远小于现行规范中 1/550 的规定,满足工程设计要求。

(2) 折减分体柱中单元柱的弹性模量和密度、单元柱之间的摩擦系数保持不变,是建立带分体柱地铁车站结构二维分析模型的有效方法。

(3) 综合考虑计算成本与计算效率,二维 Pushover 分析方法可获得与三维动力时程分析方法相近的计算结果,推荐在工程设计中使用。

参考文献:

- [1] 杜修力,李洋,许成顺,等. 1995 年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 223-236.
Du X L, Li Y, Xu C S, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 223-236. (in Chinese)
- [2] 陈国兴,陈苏,杜修力,等. 城市地下结构抗震研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 1-23.
Chen G X, Chen S, Du X L, et al. Reviews of seismic damage, model test, available design and analysis methods of urban underground structures: retrospect and prospect[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 1-23. (in Chinese)
- [3] 路德春,马超,杜修力,等. 城市地下结构抗震韧性研究进展[J]. 中国科学:技术科学, 2022, 52(10): 1469-1483.
Lu D C, Ma C, Du X L, et al. Earthquake resilience of urban underground structures: State of the art[J]. Scientia Sinica Technological, 2022, 52(10): 1469-1483. (in Chinese)
- [4] Tsinidis G, de Silva F, Anastasopoulos I, et al. Seismic behaviour of tunnels: From experiments to analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99: 103334.
- [5] 许紫刚,李淳宇,夏宗尧. 地下连续墙对无柱大跨地铁车站地震反应影响[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(4): 16-23.
Xu Z G, Li C Y, Xia Z Y. Influence of diaphragm wall on seismic response of column-free large-span subway station[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(4): 16-23. (in Chinese)
- [6] Xu C, Zhang Z, Li Y, et al. Seismic response and failure mechanism of underground frame structures based on dynamic centrifuge tests[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2021, 50(7): 2031-2048.
- [7] Zhang Z, Li Y, Xu C, et al. Study on seismic failure mechanism of shallow buried underground frame structures based on dynamic centrifuge tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 150: 106938.
- [8] 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 X L, Wang G, Lu D C. Earthquake damage mechanism analysis of Daikai metro station by Kobe Earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 165-171. (in Chinese)
- [9] 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.
Du X L, Ma C, Lu D C, 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. (in Chinese)
- [10] 许紫刚,许成顺,杜修力,等. 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[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(7): 1182-1191,1373.
Xu Z G, Xu C S, Du X L, et al. Seismic damage of Daikai station and tunnel based on quasi-static pushover analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(7): 1182-1191,1373. (in Chinese)
- [11] 梅松华,盛谦,崔臻,等. 黏弹性阻尼减震层的吸能特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 997-1005.
Mei S H, Sheng Q, Cui Z, et al. Experimental study on energy absorption property of viscoelasticity damping layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 997-1005. (in Chinese)
- [12] Zhao W, Chen W Z, Yang D. Interaction between strengthening and isolation layers for tunnels in rock subjected to SH waves [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 79: 121-133.
- [13] Chen Z Y, Chen W, Bian G Q. Seismic performance

