

DOI: 10.11779/CJGE2023S20022

# 钢管混凝土中柱地铁车站结构地震响应规律

钟紫蓝, 郭庆龙, 郭佳希, 张 卜\*, 赵 密

(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:** 为提高和改善地下结构抗震性能, 现有地铁车站结构通常采用钢管混凝土中柱, 主要考虑混凝土中柱类型对地铁车站结构的地震响应影响, 以两层三跨地铁车站作为研究对象, 采用 OpenSees 有限元软件建立土-地铁车站结构二维整体有限元模型, 并基于合成人工地震动输入土-地铁车站结构整体有限元模型, 对模型进行非线性时程分析, 研究钢管混凝土中柱地铁车站地震响应规律。结果表明: 多遇地震动和设防地震动作用下, 钢管混凝土地铁车站顶层中柱最大层间位移角相较于钢筋混凝土地铁车站分别降低了 5% 和 1%, 底层中柱最大层间位移角下降幅度仅为 24% 和 8%; 罕遇地震动作用下, 钢管混凝土中柱使地铁车站顶层和底层最大层间位移角分别降低了 9% 和 7%, 钢管混凝土中柱底部在最大变形时刻承受的剪力增加了 7%; 极端地震作用下, 地铁车站结构产生较大变形, 钢筋混凝土中柱出现破坏时刻钢管混凝土中柱并未破坏, 钢管混凝土中柱对地铁车站结构抗震性能提升作用显著。

**关键词:** 钢管混凝土; 地铁车站; 非线性时程分析; 土-地铁车站结构相互作用

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0159-06

**作者简介:** 钟紫蓝(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地下结构抗震方面的研究工作。E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn。

## Seismic response of subway station structure with concrete-filled-steel-tube middle columns

ZHONG Zilan, GUO Qinglong, GUO Jiayi, ZHANG Bu, ZHAO Mi

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

China)

**Abstract:** In order to improve the seismic performance of underground structures, the concrete-filled steel tube (CFST) middle column is usually used in the existing subway station structures. The influences of concrete middle columns type on the seismic response of subway station structures are considered. A comprehensive 2D finite element model for a two-story and three-span subway station, considering the nonlinear dynamic soil-subway station structure interaction, is established using the OpenSees in this study. By utilizing the synthetic artificial seismic ground motion inputs and conducting the nonlinear time history analysis on the model, the seismic response patterns of subway station with CFST middle columns are investigated. The results indicate that the maximum inter-story drift ratios of the top-level columns of the CFST subway station decrease by 5% and 1% under both the frequent and design-basis seismic ground motions, respectively, compared to those of the reinforced concrete subway station. The maximum inter-story drift ratios of the bottom-level columns is reduced by only 24% and 8%. The CFST middle columns reduce the maximum inter-story drift ratio of the top and bottom levels of the subway station by 9% and 7% under the rare seismic ground motions, respectively. The maximum shear force at the bottom of the CFST middle columns increases by 7% at the maximum deformation moment. The subway station structures exhibit significant deformations under the extreme seismic ground motions. The CFST middle columns are not damaged at the moment of damage in the reinforced concrete middle columns. The CFST middle columns significantly enhance the seismic resistance of subway station structures.

**Key words:** concrete of steel tube; subway station; nonlinear time history analysis; soil-subway station structure interaction

## 0 引 言

近些年来, 世界范围内相继发生数次大地震, 如: 1995 年日本阪神地震、1999 年土耳其科喀艾里地震和中国台湾集集地震、2008 年中国汶川地震、2013 年中

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52378470); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(52220105011)

收稿日期: 2023-11-30

\*通信作者 (E-mail: zhangbu@bjut.edu.cn)

国庐山地震及 2016 年日本熊本地震等,震后灾害调查显示,以地铁车站和隧道为代表的地下结构发生严重破坏,造成了巨大的经济损失和人员伤亡。根据 2016 年正式实施的《中国地震动参数区划图:GB18306—2015》<sup>[1]</sup>,中国绝大部分城市位于强震活动区。地下结构震害往往难于发现且修复困难,一旦破坏将严重影响居民的生命财产安全和社会运转。因此,对地铁车站进行抗震性能分析尤为重要。

钢管混凝土结构主要具有承载力高、延性好、经济效益高、施工方便、抗震性能优越等优点,国内外学者通常采用拟静力试验方法研究不同形式钢管混凝土的抗震性能。Sakino 等<sup>[2]</sup>通过拟静力试验研究方钢管混凝土压弯构件的滞回性能,结果表明方钢管混凝土压弯构件随轴压比和宽厚比增大,强度退化现象明显,但构件强度退化后大都趋于稳定甚至有所增长;Morino 等<sup>[3]</sup>通过拟静力试验研究单层方钢管混凝土门式框架与钢框架的抗震性能对比,试验结果表明方钢管混凝土框架的抗震性能更好;Wu 等<sup>[4]</sup>提出方钢管混凝土柱的计算模型,建立数值模型模拟钢管混凝土柱的滞回曲线与试验数据吻合;蔡邵怀等<sup>[5]</sup>对钢管混凝土柱、钢管混凝土柱和钢筋混凝土柱的抗震延性进行比较,结果表明在相同的试验条件下,钢管混凝土柱的极限位移角要明显大于钢管混凝土柱和钢筋混凝土柱;王先铁等<sup>[6]</sup>通过拟静力试验研究方钢管混凝土柱-钢梁平面框架的抗震性能,分析了轴压比和梁柱线刚度比对框架抗震性能的影响;戎芹等<sup>[7]</sup>采用 OpenSees 建立 CFST 框架-钢板剪力墙体系模型,基于 IDA 法评估 CFST 框架-钢板剪力墙的抗震性能;自 20 世纪 90 年代以来,钢管混凝土柱已在中国地铁车站施工中应用,蔡邵怀<sup>[8]</sup>汇总了采用钢管混凝土柱的地铁线名及站名,如北京地铁复八线。迄今为止,针对钢管混凝土柱和框架的抗震性能的研究相对较为完善和丰富,但采用钢管混凝土中柱的地铁车站与相同类型普通钢筋混凝土中柱的地铁车站相比,其抗震性能提升程度缺少量化的对比。

本文对不同设防烈度地震作用下的典型两层三跨地铁车站结构进行抗震性能研究,利用 OpenSees 有限元软件分别建立钢筋混凝土和钢管混凝土中柱土-地铁车站结构二维整体有限元模型,并依赖于现有的钢管混凝土柱拟静力试验进行建模验证,分析土-结构整体有限元模型在不同特性地震动作用下的结构响应,本文重点关注地铁车站的中柱损伤,并解释钢管混凝土中柱地铁车站结构地震响应规律。

## 1 钢管混凝土中柱地铁车站的建模与模型验证

### 1.1 钢管混凝土中柱截面设计

为对比钢筋混凝土中柱与钢管混凝土中柱对地铁车站结构的影响,本文根据钢筋混凝土柱和钢管混凝土柱的轴压刚度和抗弯刚度等效计算出与钢筋混凝土柱刚度相等的钢管混凝土柱尺寸数据,得到钢管混凝土柱的设计尺寸。

钢筋混凝土柱轴压刚度为  $E_c A$ , 抗弯刚度为  $E_c I$ , 式中  $E_c$  为混凝土的弹性模量,  $A$  为钢筋混凝土柱的截面面积,  $I$  为截面惯性矩。钢管混凝土柱轴压刚度  $B_{sc}$  和抗弯刚度  $B_{scm}$  计算式可参见《钢管混凝土结构技术规范:GB 50936—2014》5.1.7 和 5.1.8 节<sup>[9]</sup>。

本文参考钟陈志<sup>[10]</sup>采用等刚度设计法计算方钢管混凝土桥墩截面的工程实例,以典型两层三跨地铁车站钢筋混凝土中柱为研究对象,混凝土采用 C40, 钢筋采用 HRB400。钢筋混凝土柱截面计算得轴压刚度为  $8.125 \times 10^9 \text{ N/mm}$ 、抗弯刚度为  $1.693 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。本文钢管混凝土柱截面的钢管采用 Q345, 含钢率 0.08%, 厚度为 10 mm, 混凝土采用 C30, 由钢管混凝土柱轴压刚度  $B_{sc}$  计算式计算可得截面面积为  $241932 \text{ mm}^2$ , 选取实心方钢管截面为  $490 \text{ mm} \times 490 \text{ mm}$ , 根据抗弯刚度  $B_{scm}$  计算式计算可得实心方钢管混凝土截面的轴压刚度为  $8.063 \times 10^9 \text{ N/mm}$ 、抗弯刚度为  $1.845 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{mm}$ , 与钢筋混凝土柱截面刚度接近。钢筋混凝土柱截面及方钢管混凝土柱截面示意图如图 1 所示。

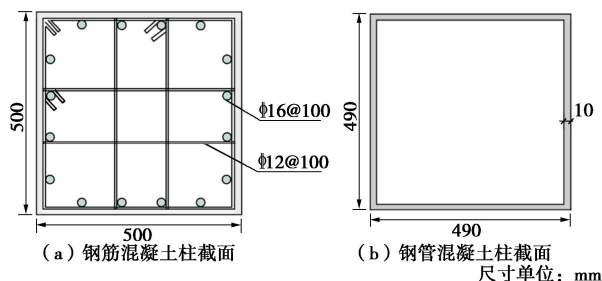


图 1 中柱截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of middle column section

### 1.2 土-地铁车站结构有限元模型建立

本文选择北京某一地区的典型场地,场地土层参数信息如表 1 所示,场地土层厚度为 60 m,土层等效剪切波速为 237 m/s,根据《城市轨道交通结构抗震设计规范:GB50909—2014》<sup>[11]</sup>属于 II 类场地。

车站结构周围土体采用四节点平面应变单元模拟,黏土采用屈服面弹塑性材料(Pressure Independent Multi Yield Material, PIMY)模拟<sup>[12]</sup>。其塑性本构屈服面模型如图 2 所示,本文采用的黏土本构模型中关键材料参数取值见表 2。砂土采用多屈服面弹塑性材料(Pressure Depend Multi Yield Material, PDMY)<sup>[12]</sup>模拟。其塑性本构屈服面模型如图 2 所示。本文采用的砂土本构模型中关键材料参数取值如表 2 所示。

表 1 场地土层物理参数表

Table 1 Physical parameters of site soil layers			
土体	厚度/m	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	剪切波速/(m·s <sup>-1</sup> )
人工填土	5.0	1750	180
粉质黏土	10.0	1900	250
细中砂	10.0	2000	300
细粉砂	15.0	2000	320
卵石	20.0	2280	500

表 2 土体材料参数取值

Table 2 Values of soil material parameters				
土体	密度/ (t·m <sup>-3</sup> )	剪切模量/ 10 <sup>4</sup> MPa	体积模量/ 10 <sup>5</sup> MPa	内摩擦角/ (°)
黏土	1.9	50	2.5	20
砂土	2.0	18	3.0	35

本研究以典型两层三跨地铁车站结构为研究对象, 地铁车站结构横断面尺寸如图 2 所示, 混凝土采用 C30, 钢管材料采用 Q345。将中柱按等刚度折减处理, 折减中柱钢筋混凝土的密度和弹性模量, 等效为适合平面应变问题的连续墙体<sup>[13]</sup>。

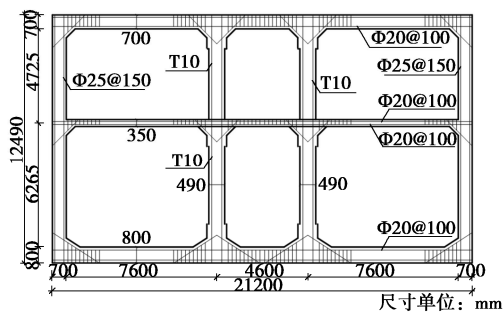


图 2 地铁车站结构横断面示意图

Fig. 2 Schematic of cross-section of subway station structures

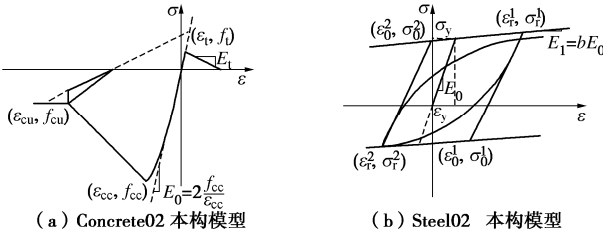


图 3 混凝土和钢材本构模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of constitutive models for concrete and reinforced steel

在 OpenSees 有限元软件中建立土-地铁车站结构整体有限元模型。车站结构采用纤维截面模拟, 梁和柱均采用基于位移的非线性梁柱单元 (disp BeamColumn) 进行模拟, 截面划分为核心混凝土和钢管。采用图 3 所示的本构模型分别模拟混凝土和钢管的非线性行为, 混凝土采用 Concrete02 本构模型进行模拟; 核心混凝土的轴心受压强度  $f_{cc}$  及其对应的峰值应变  $\varepsilon_0$  用 Mander 本构模型<sup>[14]</sup>计算公式予以计算。钢管采用 Steel02 本构<sup>[15]</sup>进行模拟。OpenSees 命令中各参数含义及取值可参考文献。

本文所建立土-地铁车站结构整体有限元模型计算宽度为 120 m, 并在模型两侧设置等位移边界来强制相同埋深处边界两侧土节点的水平向位移相同, 以此来消除边界效应对地铁车站结构地震反应的影响; 取距地表 60 m 的工程基岩面做为模型底面; 模型底部采用固定边界, 顶部自由; 地下结构与土体接触面之间同样采用“equalDOF”作绑定处理, 不考虑复杂的接触滑动问题; 阻尼设置为 Rayleigh 阻尼; 土体单元网格尺寸为 3.0 m, 结构单元及其周围加密区网格尺寸为 1.0 m, 单元网格尺寸小于 1/10~1/8 波长, 符合数值模拟精度要求<sup>[13]</sup>; 地震动加速度记录则采用基底一致激励进行输入。图 4 为土-地铁车站结构二维整体有限元模型示意图。

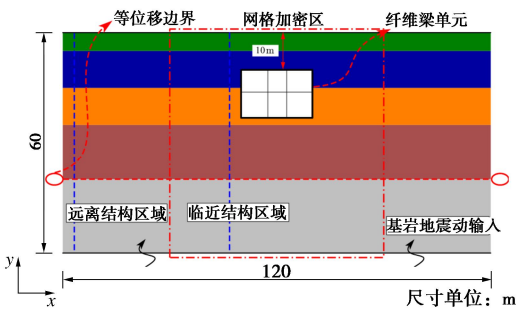


图 4 土-地铁车站结构二维整体有限元模型示意图

Fig. 4 2D integrated finite element model for soil-subway station structure interaction system

1.3 有限元模型验证

为了验证上述建模方法的准确性和合理性, 本节将对太平洋地震工程研究中心 (PEER) 数据库中钢筋混凝土柱和杜喜凯<sup>[16]</sup>开展的钢管混凝土柱拟静力试验进行模拟。限于篇幅, 上述混凝土柱试验的相关设计参数和试验结果可参见文献<sup>[16]</sup>。

图 5 为有限元数值模型模拟得出的滞回曲线与试验结果之间的对比。由图 5 可以看出, 数值模拟结果与试验结果吻合较好, 随着水平位移的增大, 试件刚度在屈曲后出现明显退化, 承载力出现较为显著的下陷段, 整体趋势和试验相同。

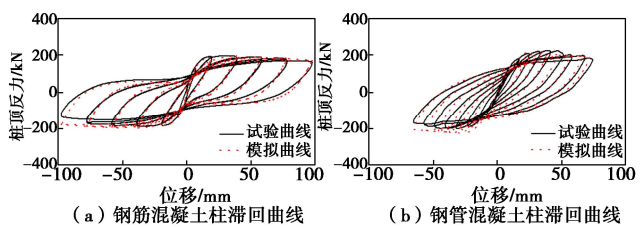


图 5 有限元模拟结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between finite element simulations and experimental results

1.4 人工地震动合成

为探究不同设防烈度下钢管混凝土地铁车站地震响应规律, 本文以中国《城市轨道交通结构抗震设计



规范: GB50909—2014》II类场地设计反应谱为例, 分别以重现期为 100, 475, 2450 a 三个地震设防水准下的设计反应谱作为目标加速度反应谱合成人工地震动, 设计地震动峰值加速度分别为  $0.1g$ ,  $0.2g$  和  $0.3g$ , 通过三角函数叠加法合成随机平稳地震动, 采用 Jennings 等提出的三段式包络函数转为非平稳过程, 得到 3 条不同设防烈度的人工地震动: 多遇地震动 (E1), 设防地震动 (E2) 和罕遇地震动 (E3), 如图 6 所示。

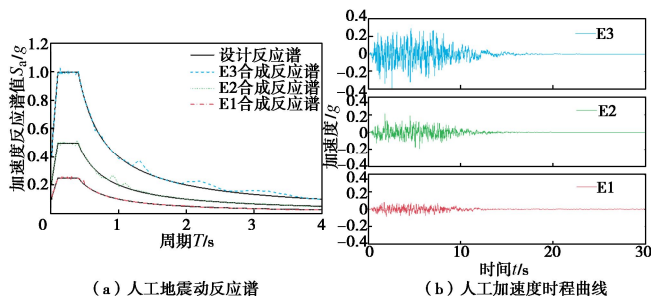


图 6 II类场地不同重现期下地震动加速度反应谱及对应的人工合成地震时程记录

Fig. 6 Response spectra of acceleration corresponding to different return periods in II site and time histories of synthetic acceleration compatible with target spectra

## 2 钢管混凝土中柱地铁车站层间变形能力及中柱地震响应分析

### 2.1 地铁车站中柱承载能力

为探究钢筋混凝土和钢管混凝土中柱地铁车站在不同设防地震动下的地震响应, 以承载能力包络线为中柱的抗震性能评价指标。在地震动作用过程中, 中柱的受力分配不断调整, 其承载能力和变形能力也随之改变。因此, 要分析两种类型中柱的地震响应, 首先要分析中柱在不同轴压比下抵抗变形的能力。

由于中柱受到顶部和底部的梁或板的约束作用, 在地震动作用下柱端近似发生水平方向的平动。因此, 分析不同轴压比  $u$  下的侧向变形能力时, 根据中柱实际工作状态设置边界条件进行推覆模拟。本文在 OpenSees 有限元软件中建立钢筋混凝土和钢管混凝土柱有限元模型, 中柱的截面、单元及本构模型与上文中土-结构整体有限元模型一致, 中柱底部采用固定边界, 在顶部施加一定的轴向荷载, 限制柱顶旋转使其沿  $X$  向平动, 直至破坏。在不同轴压比下, 对中柱进行推覆模拟, 为便于分析, 对荷载和层间变形进行了无量纲化处理, 得到钢筋混凝土中柱和钢管混凝土中柱的层间位移角与剪力比的关系曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出, 中柱的变形能力随轴压比的增大而减小, 中柱底部剪力随层间位移角的增大呈现先增大

后减小的趋势, 钢管混凝土中柱比钢筋混凝土中柱的变形能力大。

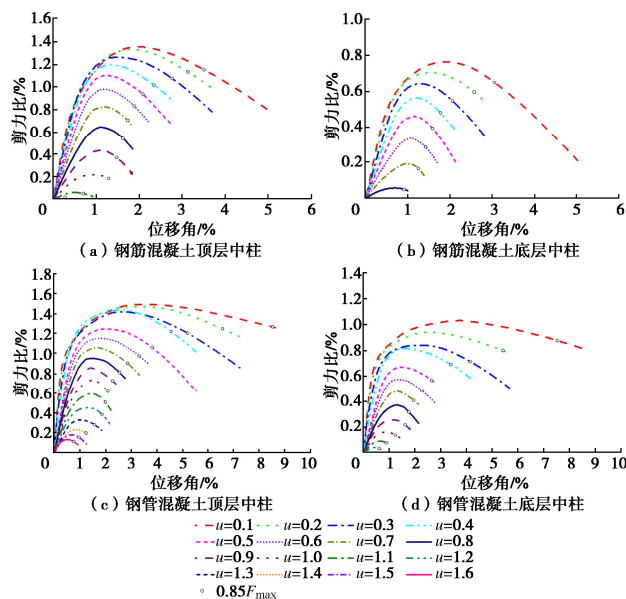


图 7 不同轴压比下中柱荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of middle column under different axial load ratio

取中柱峰值荷载下降至 85% 及对应的极限变形能力, 绘制中柱的承载能力包络线如图 8 所示, 对比可知, 钢筋混凝土和钢管混凝土中柱的变形能力均随着轴压比的增加而减小, 当钢筋混凝土顶层中柱轴压比小于 0.4 时, 其极限变形能力大于 3%, 钢管混凝土顶层中柱轴压比小于 0.6 时, 其极限变形能力大于 3%; 当钢筋混凝土底层中柱轴压比小于 0.3 时, 其极限变形能力大于 3%, 钢管混凝土顶层中柱轴压比小于 0.4 时, 其极限变形能力大于 3%。

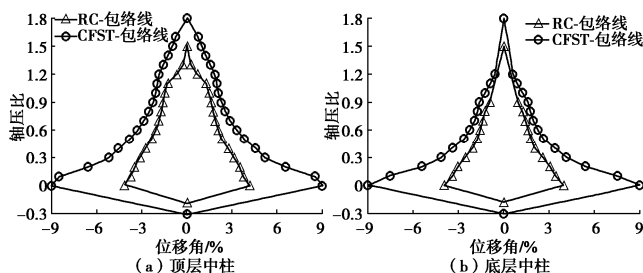


图 8 中柱承载能力包络线

Fig. 8 Envelops of loading capacity of middle column

### 2.2 中柱峰值层间位移角响应分析

从图 9 可以看出在 3 条不同设防烈度地震动作用下, 钢管混凝土地铁车站中柱最大层间位移角均小于钢筋混凝土地铁车站。从图 9 (a) 中可知在多遇地震动、设防地震动和罕遇地震动作用下, 钢管混凝土地铁车站顶层中柱最大层间位移角相较于钢筋混凝土地铁车站分别降低了 5%, 1%, 9%。从图 9 (b) 中可知在多遇地震动、设防地震动和罕遇地震动作用下, 钢

管混凝土地铁车站底层中柱最大层间位移角相较于钢筋混凝土地铁车站分别降低了 24%, 8%, 7% 左右。

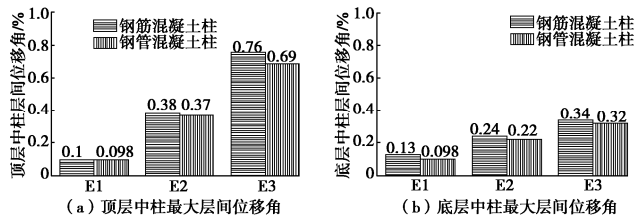


图 9 地铁车站中柱最大层间位移角响应分析

Fig. 9 Response analysis of maximum inter-story drift ratio of middle column in metro station

由于结构薄弱环节钢管混凝土底层中柱的最大层间位移角相较于钢筋混凝土中柱的下降幅度并不明显, 不能直观反映地铁车站结构安全性的变化。为研究钢管混凝土中柱地铁车站结构较钢筋混凝土中柱地铁车站结构的安全性, 定义地下结构最大变形能力系数  $\kappa$  为

$$\kappa = \frac{\theta_{\text{Push}}}{\theta_{\text{Dyn}}} \quad (1)$$

式中:  $\theta_{\text{Push}}$  为底层中柱 Pushover 曲线中极限荷载点所对应的层间位移角;  $\theta_{\text{Dyn}}$  为动力时程分析后所得最大层间位移角。

由图 8 可知, 本文采用的钢管混凝土及钢筋混凝土中柱地铁车站结构极限荷载点对应的层间位移角分别为 3.04%, 5.41%。由此计算可得, 多遇地震动下钢管混凝土和钢筋混凝土中柱地铁车站结构最大变形能力系数  $\kappa$  分别为 55.2, 23.4, 设防地震动下分别为 24.6, 12.7, 罕遇地震动下分别为 16.9, 8.9, 即钢管混凝土中柱地铁车站结构的安全性高于钢筋混凝土中柱地铁车站, 且随着地震动烈度增加, 结构的安全性降低。

### 2.3 墙柱底部最大变形时刻剪力响应分析

为分析钢管混凝土中柱对地铁车站受力性能的影响, 本文采用陈之毅<sup>[17]</sup>提出的柱墙剪力比作为两种地铁车站抗震性能评价指标, 因此, 本节提取了两种形式地铁车站侧墙与中柱底部最大变形时刻的剪力值, 如图 10 所示。

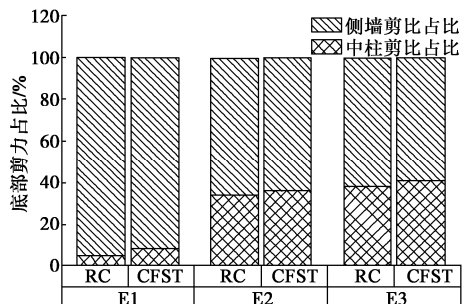


图 10 地铁车站侧墙与中柱底部最大变形时刻剪力值

Fig. 10 Shear forces of maximum deformation moment at bottom of side wall and middle column in metro station

从图 10 可知, 两种形式地铁车站侧墙相较于中柱

承受较大的剪力值, 且钢管混凝土中柱底部剪力占比大于钢筋混凝土中柱。在多遇地震动作用下, 钢管混凝土与钢筋混凝土地铁车站中柱底部承受的剪力占比比较小; 而在设防地震动和罕遇地震动作用下, 钢管混凝土中柱底部承受的剪力较钢筋混凝土中柱增加了 7%。

### 2.4 极端地震荷载工况下车站结构响应

为对比两种类型中柱开始破坏时刻地震响应, 且两者在罕遇地震动作用下并未发生破坏, 因此, 增加输入人工地震动峰值加速度, 根据 II 类场地设计反应谱生成人工地震动, 设计地震动峰值加速度为 0.8g。将静力荷载作用下获得的承载能力包络线和中柱的地震响应绘制在一起, 如图 11 所示。

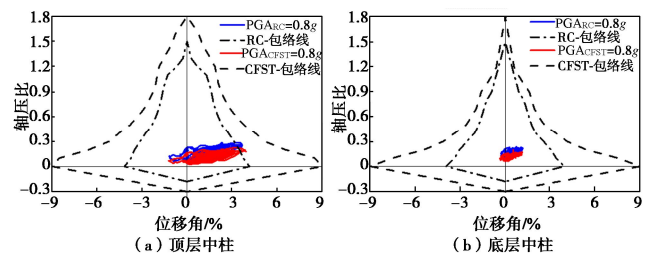


图 11 地铁车站结构响应与承载能力包络线

Fig. 11 Seismic responses of structure and envelopes of loading capacity in metro station

从图 11 可以看出, 钢筋混凝土顶层中柱在轴压比为 0.18 时, 层间位移角的最大值约为 4%, 此时钢筋混凝土顶层中柱层间位移角最大值已超过中柱极限变形能力 3.04%, 而钢管混凝土顶层中柱在轴压比为 0.25 时, 层间位移角的最大值约为 3.8%, 此时钢管混凝土顶层中柱层间位移角最大值未超过中柱极限变形能力 5.41%; 钢筋混凝土底层中柱在轴压比为 0.17 时, 层间位移角的最大值约为 1.1%, 钢管混凝土顶层中柱在轴压比为 0.21 时, 层间位移角的最大值约为 1.2%。因此, 钢筋混凝土顶层中柱地震响应超出了其变形能力, 但钢管混凝土顶层中柱地震响应未超过其变形能力, 并未发生破坏。

## 3 结 论

本文重点分析了不同设防烈度地震动下钢管混凝土中柱地铁车站结构地震响应规律, 得到以下 3 点结论。

(1) 对于典型两层三跨地铁车站结构, 多遇地震动和设防地震动作用下, 钢管混凝土中柱较钢筋混凝土中柱下的地铁车站的动力响应变化幅度小, 钢管混凝土地铁车站顶层中柱最大层间位移角相较于钢筋混凝土地铁车站分别降低了 5% 和 1%, 底层中柱最大层间位移角下降幅度仅为 24% 和 8%。

(2) 罕遇地震动作用下, 钢管混凝土中柱地铁车站的动力响应有显著降低, 相较于钢筋混凝土中柱,

钢管混凝土中柱使地铁车站顶层和底层最大层间位移角分别降低了 9%和 7%，钢管混凝土中柱底部在最大变形时刻承受的剪力增加了 7%，钢管混凝土中柱地铁车站结构的安全性高于钢筋混凝土中柱地铁车站，故钢管混凝土中柱可有效提升地铁车站的抗震性能。

(3) 极端地震荷载作用下，地铁车站结构产生较大变形，钢管混凝土中柱对地铁车站结构抗震性能提升作用显著，钢筋混凝土中柱出现破坏时刻钢管混凝土中柱并未破坏，故钢管混凝土中柱地铁车站可适用于抗震设防要求较高的地区。

### 参考文献：

- [1] 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. (Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China: GB 18306—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese))
- [2] SAKINO K, TOMII M. Hysteretic behavior of concrete filled square steel tubular beam-columns failed in flexure[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1981, **3**(6): 439-446.
- [3] MORINO S, KAWAGUCHI J, YASUZAKI C, et al. Behavior of concrete-filled steel tubular three-dimensional subassemblages[C]// Proceeding of the Engineering Foundation Conference on Composite Construction in Steel and Concrete II. Potosi, 1993.
- [4] WU S F, LIU W G, ZHANG J, et al. Experimental and analytical investigation of square-shaped concrete-filled steel tube columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, **201**: 107737.
- [5] 蔡绍怀(Cai Shao-huai). 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (CAI Shaohuai. Modern Steel Tube Confined Concrete Structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [6] 王先铁, 郝际平, 周观根, 等. 方钢管混凝土柱-钢梁平面框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, **31**(8): 8-14. (WANG Xiantie, HAO Jiping, ZHOU Guangen, et al. Experimental research on seismic behavior of concrete filled square steel tube columns and steel beam planar frames[J]. Journal of Building Structures, 2010, **31**(8): 8-14. (in Chinese))
- [7] 戎 芹, 侯 健, 郭兰慧, 等. 钢管混凝土框架-两边连接钢板组合剪力墙结构反应修正系数分析[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(增刊 2): 45-50. (RONG Qin, HOU Jian, GUO Lanhui, et al. Structural response modification coefficient analysis of CFST frame-composite steel plate shear walls with two-side connections[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(S2): 45-50. (in Chinese))
- [8] 蔡绍怀. 我国钢管混凝土结构技术的最新进展[J]. 土木工程学报, 1999, **32**(4): 16-26. (CAI Shaohuai. Recent development of steel tube-confined concrete structures in China[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, **32**(4): 16-26. (in Chinese))
- [9] 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures: GB 50936—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [10] 钟陈志. 方钢管混凝土桥墩抗震性能数值模拟与分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2022. (Seismic Performance of Concrete Filled Steel Tubular Piers Numerical Simulation and Analysis[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [11] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. (Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures: GB 50909—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese))
- [12] MCKENNA F T. OpenSees[J]. Computing in Science and Engineering, 2011.
- [13] HUO H, BOBET A, FERNÁNDEZ G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the Daikai Station[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(12): 1522-1533.
- [14] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, **114**(8): 1804-1826.
- [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] 杜喜凯. 往复荷载作用下钢管混凝土柱性能试验及理论分析[D]. 天津: 天津大学, 2010. (DU Xikai. Performance Test and Theoretical Analysis of Concrete-Filled Steel Tubular Columns under Reciprocating Load[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese))
- [17] 陈之毅, 樊一凡, 黄鹏飞, 等. 基于 pushover 法的地铁车站柱墙剪力比研究[J]. 土木工程学报, 2020, **53**(增刊 1): 233-237, 251. (CHEN Zhiyi, FAN Yi-an, HUANG Peng-ei, et al. Column-wall shear ratio of subway station based on pushover method[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, **53**(S1): 233-237, 251. (in Chinese))

(编校: 孙振远)