

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240724003

地铁车站自复位中柱性能及参数变化研究*

范智双, 权登州, 柴少波, 张永坤, 卜永红

(长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 基于可恢复性抗震理念, 提出一种新型中柱体系, 旨在为地铁地下结构提供优异的抗震性能及自复位功能。通过ABAQUS软件, 模拟分析了新型柱的自复位性能、水平变形能力及抗剪承载能力等基本性能, 并探讨了初始预应力值、预应力筋数量和柱头尺寸三种参数变化对新型柱性能的影响情况。结果表明: 相比传统固接柱, 新型柱不仅表现出良好的自复位能力, 还具备明显的水平变形和损伤特征优势。适当减小初始预应力值有利于改善新型柱的自复位性能; 减少预应力筋数量、增大柱头, 都有利于提升小轴压比下新型柱的自复位性能, 反之增加筋数、减小柱头, 则有利于提升大轴压比下新型柱的自复位性能。参数变化对水平变形能力的影响仅当轴压比小于0.7时表现明显, 该轴压比条件下, 初始预应力值越小、预应力筋数量越多, 新型柱变形能力越强; 柱头的设置有利于新型柱变形能力的提升, 但其尺寸影响并不显著; 初始预应力值取500 MPa、预应力筋设置一排、柱头半径0.2 m为最佳组合。参数变化对新型柱抗剪承载力影响并不明显。研究成果可为地铁地下结构可恢复性抗震体系的深入研究与设计提供参考价值。

关键词: 可恢复性; 地铁车站; 中柱; 数值模拟; 参数变化

中图分类号: TU93; U231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1200-12

Study on Performance and Parameter Variations of Self-centering Middle Columns in Metro Stations

FAN Zhishuang, QUAN Dengzhou, CHAI Shaobo, ZHANG Yongkun, BU Yonghong
(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Based on the concept of seismic resilience, this study proposes a new middle column system, aiming to provide excellent seismic performance and self-centering capability for metro underground structures. Using ABAQUS software, the basic performance of the new columns, including their self-centering capability, horizontal deformation capacity, and shear bearing capacity, was simulated and analyzed. The effects of three parameter variations—initial prestress value, number of prestressing tendons, and column head size—on the performance of the new columns were further investigated. The results showed that compared to traditional consolidated columns, the new columns not only demonstrated good self-centering capability but also had significant advantages in horizontal deformation and damage characteristics. Appropriately reducing the initial prestress value was beneficial for

* 收稿日期: 2024-07-24; 修回日期: 2024-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172302)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2025JC-YBMS-535)、陕西省重点研发计划(2025SF-YBXM-525, 2025SF-YBXM-539)资助

作者简介: 范智双(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事地下结构抗震及可恢复性研究。E-mail: 1844306012@qq.com

通信作者: 权登州(1983—), 男, 硕导, 博士。主要从事地下结构抗震及可恢复性研究。E-mail: qdz0809@chd.edu.cn

improving the self-centering capability of the new columns. Decreasing the number of prestressing tendons and increasing the column head size both enhanced the self-centering capability under low axial compression ratios, while increasing the tendon quantity and reducing the column head size were favorable for improving the self-centering capability under high axial compression ratios. The effect of parameter variation on the horizontal deformation capacity was evident only when the axial compression ratio was less than 0.7. Under the condition of this axial compression ratio, smaller initial prestress values and a greater number of prestressing tendons resulted in enhanced deformation capacity of the new columns. The incorporation of a column head was beneficial for enhancing the deformation capacity of the new columns, but its size had no significant effect. The optimal combination was an initial prestress value of 500 MPa, a single row of prestressing tendons, and a column head radius of 0.2 m. Parameter variations had little effect on the shear bearing capacity of the new columns. The research findings can provide valuable references for the further research and design of resilient seismic systems for metro underground structures.

Keywords: resilience; metro station; middle column; numerical simulation; parameter variation

0 引言

由于地下结构深埋地下并长期受周围土体的约束,其加速度响应一般低于地面结构,长期以来人们普遍认为地下结构的抗震性能优于地面结构。直到1995年,日本阪神7.2级地震造成神户市大开地铁车站和地下综合管廊2#线的严重破坏^[1],城市地下结构抗震安全问题才逐渐引起国际工程领域的广泛关注。自此,国内外学者对以地铁车站为代表的地下结构的地震响应特征开展了深入研究^[2-7]。

已有研究表明^[6,8],地铁车站中柱为抗震薄弱构件,对整体结构的抗震稳定性具有显著性影响。相较其他构件,中柱的抗剪切变形能力明显不足,因此其震中损伤往往更为严重。尤其是强地震作用下,主体结构的崩塌常因中柱水平位移能力不足而直接导致。因此,增强中柱的水平位移能力对于提升地下结构的抗震性能至关重要。为了实现这一点,安林轩^[9]和马超等^[10]分别采用玄武岩纤维布和碳纤维增强复合材料加固的方式提高柱身的抗剪承载力及变形能力;邵文等^[11]、许紫刚^[12]和许成顺等^[13]对柱身结构进行了改造,采用分体柱代替传统整体柱的设计,以增加中柱的变形能力并降低所承受的剪力;路德春等^[14-15]提出一种可提高地铁车站中柱变形能力的中柱形式-新型叠层夹芯柱,相比传统的矩形、圆形柱,结构破坏更小;还有学者^[16-21]将隔震支座设置于中柱端部,将原顶、底板传递到中柱的变形转移至支座上,支座通过塑性变形、摩擦

滑移等方式切断水平地震荷载的传递路径,从而有效减轻地震作用引起的中柱损伤。

尽管以上措施在提升地下结构的抗震性能、减轻中柱损伤等方面取得了一定成效,但这些措施也不可避免地导致了较大的结构变形,甚至残余变形。这会对结构的震后维修和长期稳定性产生一定负面影响。为此,有学者^[22]提出了增强结构震后可恢复性的优化策略,旨在最小化地震引起的负面影响。A. Mikami等^[23]提出利用顶板及上覆土自重为结构提供恢复力的方法,并提出一种具备自复位能力的柱板连接方式,中柱在上部压力作用下,绕板柱连接节点旋转,直至上下连接节点在同一竖直线上,以达到消除地下结构残余位移的效果。杜修力等^[24]基于韧性设计提出一种可控制失效模式并具备自复位能力的截断中柱结构,即将中柱顶底两端截断,截断处辅以剪力键连接。阴孟莎^[25]还在此基础上提出了可更换柱脚易损部位的新型地下结构复合截断中柱,王高凤^[26]则在柱脚处设置了可更换耗能装置。Z. Y. Chen等^[27]将中柱底部截断,将自复位耗能柱基引入柱底四角,柱底截断处采用无粘结预应力筋加以连接,并对地铁车站进行了数值分析。Y. C. Wang等^[28]将带摩擦阻尼器的自复位中柱应用到地下结构的抗震性能研究上,其摩擦阻尼器设置在中柱顶部,中柱顶部和底部放开约束,并通过无粘结预应力筋连接。

综上所述,基于结构层面的可恢复性抗震设计主要依靠上覆土压力和结构自身重量提供恢复力;以中柱一端或两端的截断设计方式实现隔震;其截

断部位多采用剪力键或预应力筋加强连接,确保结构的整体稳定性和促进结构的震后恢复。本文基于上述研究,针对地下车站的薄弱环节——中柱,提出了一种基于可恢复性抗震设计目标、适用于装配式地下框架结构的新型自复位中柱方案。该方案不仅吸取了截断柱在抗震及自复位等方面的设计优点,还在原有基础上引入圆柱面接触式柱头设计,进一步优化了结构,在提高结构变形能力和消除残余位移等方面具有显著优势。

1 新型中柱结构设计及变形恢复机制

1.1 结构设计

新型自复位中柱体系包括以下组成部分:圆柱面接触式柱头、柱身、上支座和下支座,如图1所示。上、下支座与柱身之间采用柱头连接。中柱柱身尺寸为 $0.8\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 4.36\text{ m}$;两接触式柱头是截面半径为 r 的半圆柱体,分别位于柱子顶、底两侧,与柱身固定连接,共同构成新型中柱;上、下支座由板和纵梁组成,纵梁内部设置了与接触柱头尺寸相同的凹槽,用于卡住柱头。此外,中柱两侧分别设置通高的无粘结预应力筋,预应力筋采用公称直径为 15.2 mm 的七股钢绞线,两端分别锚固于顶、底板,保护层厚度 100 mm 。

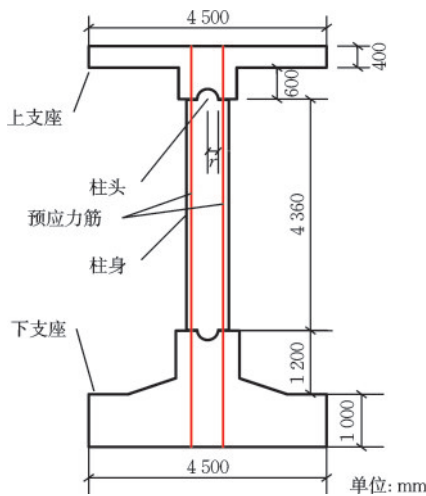


图1 新型柱结构设计

Fig.1 Design of new column structure

为避免混凝土之间因挤压摩擦而造成梁柱接触面上过早产生拉压破坏,将柱头的全部和柱身两端及支座凹槽 20 mm 范围内的材料均设置为Q235钢材,具体设置如图2所示。

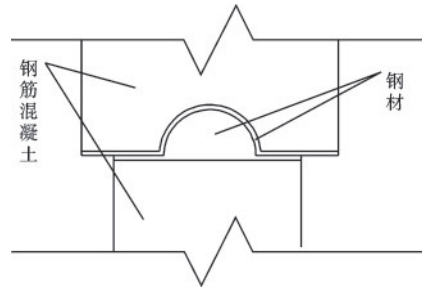


图2 新型柱材料示意

Fig.2 Schematic diagram of new column material

中柱的配筋布置情况如图3所示,新型柱的纵筋配筋率为 1.18% ,与原结构的配筋率保持一致,普通钢筋笼采用HRB400的螺纹钢筋,屈服强度 400 MPa ,保护层厚度为 30 mm 。

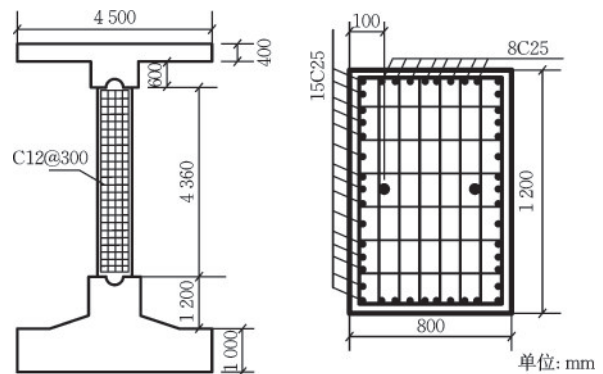


图3 结构配筋示意

Fig.3 Schematic diagram of structural reinforcement

1.2 变形恢复机制

本研究采用新型接触式柱头代替传统地铁车站中柱与纵梁间的刚性节点,以释放结构柱端弯矩,提升中柱的变形能力;而中柱两侧沿竖向设置的通高无粘结预应力钢筋,还起到加强梁柱连接、减小残余变形的作用。水平地震作用下,新型柱的变形恢复机制如图4所示。

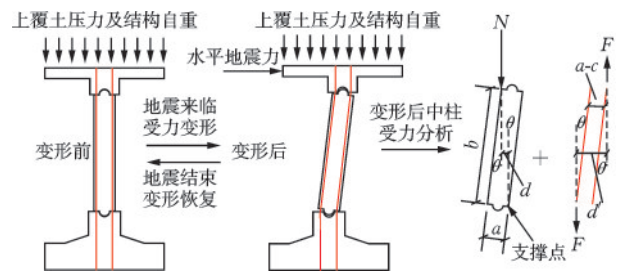


图4 地震作用的变形恢复机制

Fig.4 Deformation recovery mechanism under seismic action

地震作用前,中柱通过柱头与梁板连接,此时中柱与上下梁板支座处于“闭合”状态,中柱主要承担来自上覆土及结构自重带来的轴向压力。地震来临时,地下车站因受土体的剪切作用而发生水平变形;该变形会引起中柱与支座的接触面发生“分离”而使中柱偏转,并引起上、下梁板间产生相对位移;由于中柱与纵梁连接处是断开的,这使得梁柱连接节点处避免出现较大的弯矩和明显的“塑性铰”,从而有效提升柱子的水平位移能力;此外,接触式柱头和无粘结预应力筋的设置还能起到限位作用,防震中柱与纵梁因“分离”过大而滑脱。

当地震力作用结束,在上覆土压力及上部结构自重作用下,中柱顶端边缘处受到的竖向压力 N 形成一个恢复力矩 $M=Nd$,其中 $d=(a-b\tan\theta)\cos\theta$ 为 N 的作用方向与底部支撑点间的垂直距离(力臂), a 和 b 为中柱的截面宽度和高度, θ 为中柱的旋转角度。该力矩 M 可使中柱绕自身形心发生旋转而回归竖直状态,消除连接部位的残余位移。此外,中柱两侧竖向布置的无粘结预应力筋还提供了一对大小(为 F)相等方向相反的拉力,该对拉力在保证梁柱连接的同时,还形成了促进中柱旋转复位的力偶 $M'=Fd'$,其中 $d'=\frac{a-c}{\cos\theta}+[b-(a-c)\tan\theta]\sin\theta$ 为两个拉力之间的垂直距离(力偶臂), c 为预应力筋的保护层厚度。最终在上部荷载及预应力的共同作用下,中柱与支座间重新“闭合”,实现自复位。

2 新型中柱有限元分析模型

2.1 模型建立

为保证计算精度,新型中柱体系的柱头、柱身及上、下支座均采用完全积分三维实体单元(C3D8)建立。柱头与柱身部件通过布尔运算进行合并,构成中柱整体模型。普通钢筋采用三维桁架单元(T3D2)建立,普通钢筋通过“Embed”的方式嵌入中柱内,由于本文的研究重点为中柱,因此不考虑上下梁板支座的塑性损伤和配筋情况。

中柱与支座的接触面之间可以产生“分离”和“闭合”,存在切向摩擦和竖向压力,因此在相互作用属性中设置法向“硬接触”行为和切向摩擦行为来描述新型中柱与纵梁支座的接触行为。摩擦系数 μ 能反应接触面的切向摩擦行为,本文将柱身与纵梁支座间的接触平面,摩擦系数设为0.6^[26];柱头

与纵梁支座间的接触曲面,摩擦系数设为0.01,即认为二者间的摩擦较小。

无粘结预应力筋的受力状态为:轴向不受约束,可自由滑动,其线形随混凝土柱的变形而变形。为实现这样的无粘结状态,以刚性弹簧约束预应力筋的横向变形,引入虚拟筋作为间接连接构件,并通过局部坐标指引弹簧方向。具体实现过程如下:

首先,将预应力筋向柱截面高和宽两个方向各复制一根虚拟筋,间距设为5 mm,为保证划分网格时三根预应力筋的节点处于在同一水平位置,需通过布尔运算进行合并。其次,以预应力筋上的节点为原点建立局部坐标系,其轴向为 Z 轴,使两根虚拟筋上同一水平位置的节点分别处于局部坐标的 X 轴和 Y 轴上。依照局部坐标系,将预应力筋上的节点与 X 轴和 Y 轴虚拟筋上的节点采用刚性弹簧连接,单元类型为Spring2,连接方式如图5所示。最后,将虚拟筋通过“Embed”的方式嵌入混凝土内,以保证虚拟筋与混凝土之间不发生相对滑移,同时将预应力筋的两端通过“Tie”的方式绑定在上、下板表面,模拟对无粘结预应力筋的两端的锚固效果。

为保证虚拟筋的存在不影响结构的力学性能,将其弹性模量设为1 Pa,横截面积设为 10^{-11} mm^2 。刚性弹簧的刚度应足以保证对预应力筋的横向约束,弹簧刚度设为 10^{18} Pa 。

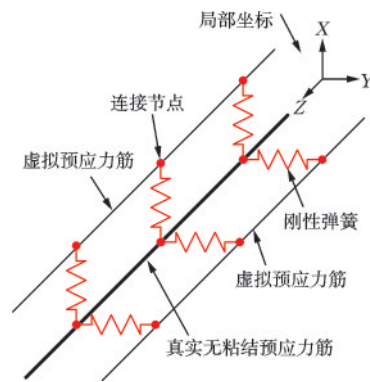


图5 刚性弹簧连接及局部坐标设置

Fig.5 Rigid spring connection and local coordinate setup

2.2 材料本构及参数

本研究结构主要采用C40混凝土,由于混凝土材料具有很强的非线性特征,因此本文采用了ABAQUS软件中提供的一种适用情况广泛,可以模拟混凝土材料由于拉裂或者压碎而引起的材料刚度退化现象的塑性损伤模型(Concrete Damaged

Plasticity, 简称 CDP 模型), 此模型是在 Lubliner 和 Lee 提出的塑性损伤模型基础上发展而来的, 通过受压损伤因子和受拉损伤因子两个变量分别描述混凝土的受压时和受拉时的刚度退化情况。具体模型参数设置见表 1。普通钢筋采用理想弹塑性模型, Q235 钢材及预应力筋则采用双折线模型。具体材料参数见表 2。

表 1 混凝土塑性损伤模型参数

模型参数	取值	模型参数	取值
密度/(kg·m ⁻³)	2 500	剪胀角	30°
弹性模量/MPa	3.25×10 ⁴	偏心率	0.1
泊松比	0.2	f _{bo} /f _{co}	1.16
抗压强度/MPa	26.8	Kc	0.666 7
抗拉强度/MPa	2.39	粘性系数	0.001

表 2 其他材料参数

材料名称	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
普通钢筋	7 800	2×10 ⁵	0.3	400	—
预应力筋	7 800	1.95×10 ⁵	0.3	1 320	1 860
Q235	7 850	2.06×10 ⁵	0.3	235	375

2.3 分析步及边界条件设置

本研究需要设置三个分析步, 即轴向荷载分析步、预应力荷载分析步以及位移分析步。轴向荷载分析步用来施加轴向压力以模拟中柱受到的覆土压力和结构自重; 预应力荷载分析步以“降温法”对预应力筋施加初始预应力, 降温幅值可通过公式(1)计算; 位移分析步用来施加水平位移。降温公式如下:

$$\Delta T = \frac{F}{E_s A \alpha} \quad (1)$$

式中, ΔT 表示预应力钢绞线降温幅度(°C); F 表示初始预应力值; E_s 表示预应力钢绞线弹性模量; A 表示预应力钢绞线截面积; α 表示预应力钢绞线热膨胀系数, 一般取 1.2×10^{-5} 。

在边界设置上, 上支座在轴向荷载和预应力荷载分析步中只允许产生竖向位移以保证柱子受到轴压, 在位移分析步中还需要放松水平方向约束以便于位移加载; 而下支座则始终保持全约束。轴向压力和水平位移均施加在上支座上, 此步骤

需要将上支座外表面耦合到参考点上, 轴向压力施加在参考点的竖向, 位移则施加在参考点的水平方向。

3 计算结果及分析

3.1 新型柱的基本性能分析

为验证新型柱在抗震及自复位等方面的优势, 对新型柱和传统固接柱进行了低周循环加载和静力推覆研究, 从自复位性能、变形能力、承载能力和塑性损伤方面, 详细对比和分析了两类柱型的基本性能。本节新型柱设计参数见表 3 中的工况 S2。

表 3 工况设计表

工况名称	中柱类型	柱头尺寸 r /m	初始预应力/MPa	预应力筋数量/排
G	固接柱	—	—	—
S1	新型柱	0.2	500	1
S2	新型柱	0.2	700	1
S3	新型柱	0.2	900	1
S4	新型柱	0.2	700	0
S5	新型柱	0.2	700	2
S6	新型柱	0	700	1
S7	新型柱	0.1	700	1
S8	新型柱	0.3	700	1

3.1.1 自复位性能

低周循环加载的位移-时程曲线如图 6 所示, 加载峰值 100 mm, 每级加载增幅 10 mm, 总加载时间 40 s。

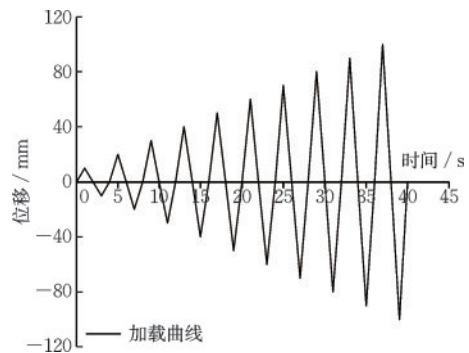


图 6 加载时程

Fig.6 Load time history

固接柱与新型柱在轴压比分别为 0.5、0.7 和 0.9 时的滞回曲线, 如图 7 所示。从滞回特征来看, 轴压

比为0.5和0.7时,如图7(a)、(b),与固接柱相对饱满的情况不同,新型柱的滞回曲线则呈现出典型的“旗帜”型特征,残余位移较小,表现出良好的自复位能力;当轴压比增大到0.9时,如图7(c),新型柱的滞回特征与固接柱相似,残余位移显著增大,自复位能力很差。此外,由于未考虑钢筋与混凝土间的粘结滑移,所以图中未出现“捏缩”效应。

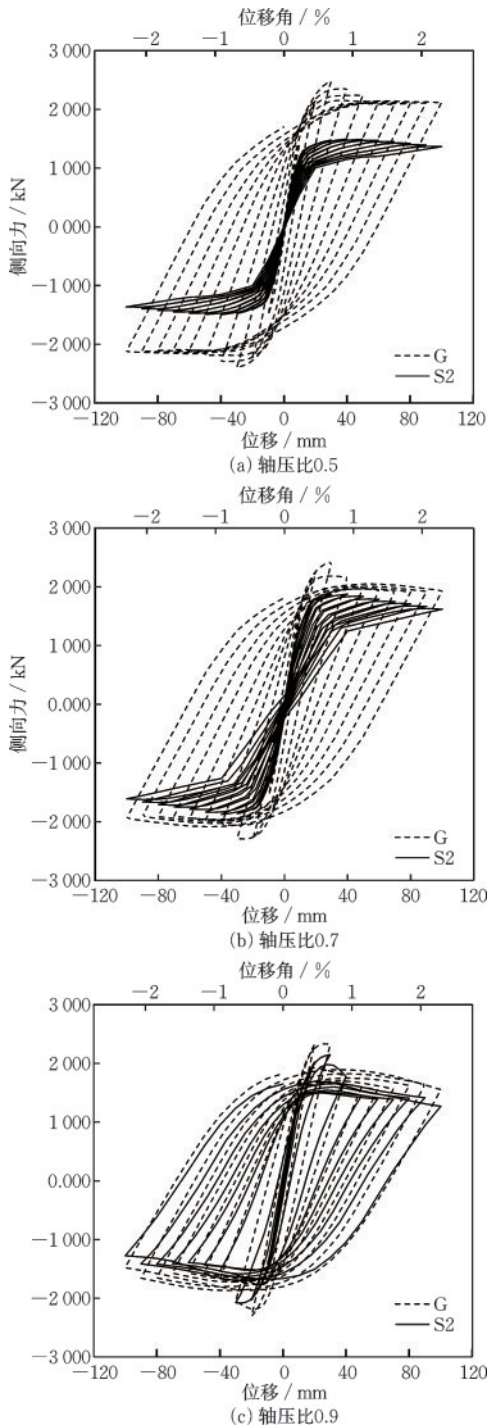


图7 滞回曲线

Fig.7 Hysteresis curves

残余位移是自复位性能评价的重要指标,本文通过残余位移角来描述残余位移情况。为了解新型柱的自复位性能与加载位移的关系,以残余率(某一级加载结束后试件的残余位移与该级最大加载位移的百分比)反映试件在卸除后的自动变形恢复能力。

图8描绘了新型柱与传统固接柱的残余位移角随轴压比的变化情况。当峰值位移为100 mm时,新型柱在轴压比不超过0.7时,残余位移角保持在1.7%以内,远小于固接柱,且增长相对缓慢;当轴压比超过0.7时,残余位移角呈直线迅速增长,在轴压比达0.8时,残余位移角达到固接柱的60%左右,而当轴压比达0.9时,残余位移角已基本接近固接柱。

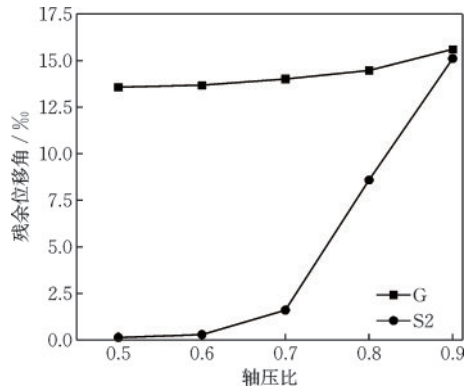


图8 峰值位移100 mm下新型柱与固接柱的残余位移角曲线
Fig.8 Residual displacement angle curves of new columns and consolidated columns at peak displacement of 100 mm

图9为轴压比从0.5至0.9,新型柱残余率与峰值位移的关系曲线。当轴压比不超过0.7时,残余率对峰值位移的变化并不敏感,残余率基本保持在10%以内。当轴压比超过0.7时,残余率随峰值位

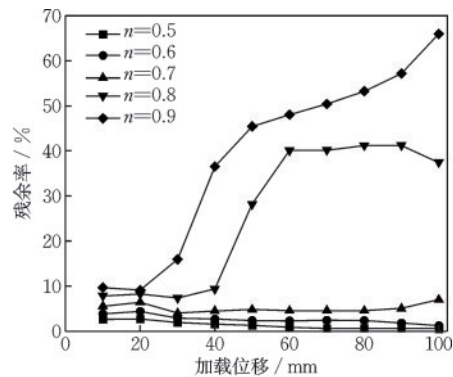


图9 不同峰值位移下新型柱的残余率曲线

Fig.9 Residual ratio curves of new columns at different peak displacements

移的增大出现了显著变化,轴压比为0.8和0.9的试件,分别在峰值位移超过40 mm和20 mm以后出现了迅速增大的情况。

由上述分析可知,相较传统固接柱,新型柱的自复位性能得到明显提升,且受加载位移及轴压比影响明显。当轴压比不超过0.7或峰值位移不超过20 mm的情况下,新型柱的残余率能稳定在10%以内,具有良好的变形恢复效果。

3.1.2 变形及承载能力

图10(a)、(b)分别为固接柱和新型柱在轴压比 n 为0.3~1.1时的承载力-位移曲线,反应了两类柱子在不同轴压比下的承载能力和变形能力。

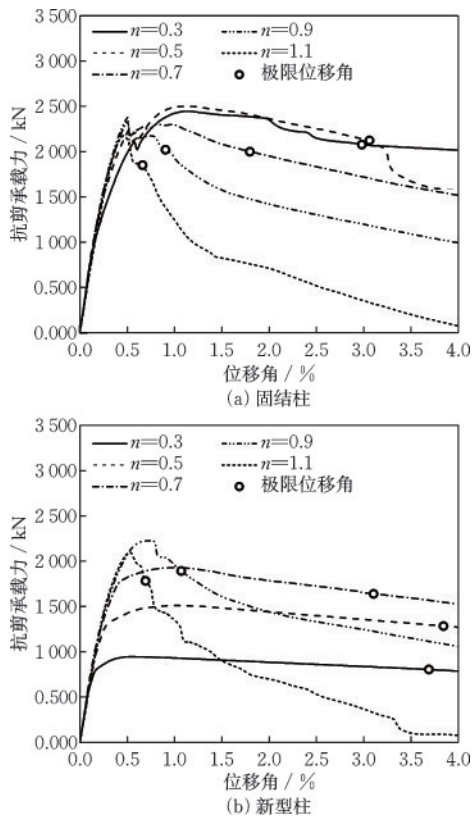


图10 不同轴压比下承载力-位移曲线
Fig.10 Bearing capacity-displacement curves at different axial compression ratios

将不同轴压比下,承载力下降至峰值承载力85%时所对应的水平位移角(以“○”标注)连接,得到水平变形能力包线,如图11。将不同轴压比下,承载力峰值节点连接,得到抗剪承载力-轴压比变化曲线,如图12所示。

对比图11中两类柱子的水平变形包线发现,当轴压比不超过1.1时,新型柱的变能力包线始终处

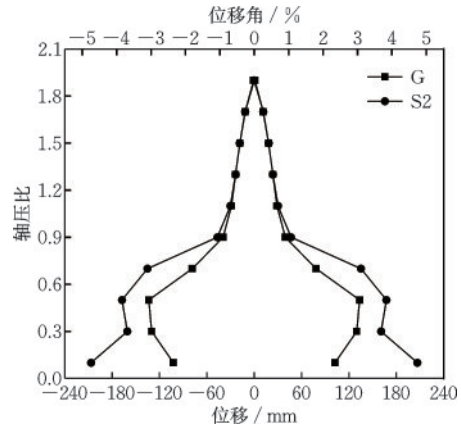


图11 水平变形能力包线
Fig.11 Envelope curves of horizontal deformation capacity

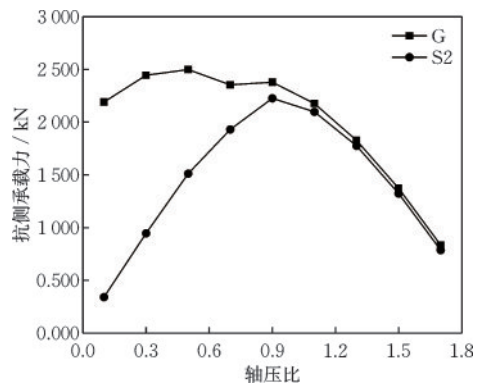


图12 承载力-轴压比曲线
Fig.12 Bearing capacity-axial compression ratio curves

于固接柱外侧,其水平变形能力得到大幅提升;但当轴压比超过1.1后,二者变形能力相差不大。可见,同等轴压条件下,新型柱具备更强的水平变形优势。

图12中,当轴压比小于0.9时,新型柱的承载力要明显低于固接柱,但随着轴压比的增大,二者差距逐渐减小;当轴压比为0.9时新型柱的承载力达到极限值,但仍略低于固接柱;当轴压比超过0.9时,新型柱与固接柱的承载力具有相同的变化规律,即承载力随轴压比增大而减小,且此时二者承载能力几乎一致。

3.1.3 等效塑性应变

等效塑性应变能表征柱子的塑性变形及损伤程度。由图13(a)、(b)可知,当轴压比为0.5和0.7时,新型柱的塑性应变要明显低于固接柱,且损伤部位也更加集中,塑性变形部位主要发生在柱端的受压边缘处;当轴压比增大到0.9时,如图13(c),两类柱子的塑性变形部位和损伤程度方面均趋于相似。

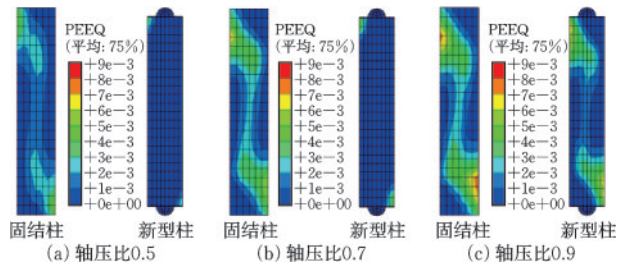


图 13 不同轴压比下推覆位移为 60 mm 的等效塑性应变云图
Fig.13 Contour maps of equivalent plastic strain at 60 mm thrust displacement at different axial compression ratios

图 14 对比了两类柱在 60、100 和 140 mm 三种推覆位移下的等效塑性应变情况。在轴压比为 0.7 的条件下,随着推覆位移的增大,除损伤程度增大,新型柱的损伤部位及范围并未出现明显变化,且损伤程度始终低于固接柱。

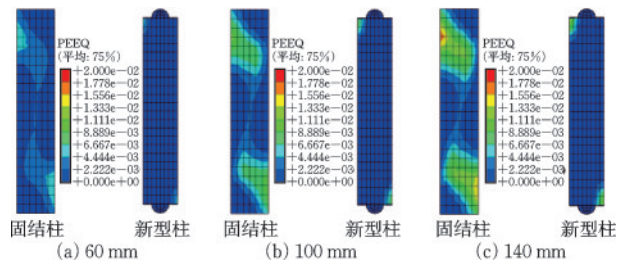


图 14 轴压比为 0.7 时不同推覆位移下的等效塑性应变云图
Fig.14 Contour maps of equivalent plastic strain at different thrust displacements at an axial compression ratio of 0.7

由此可见,相比较固接柱的大范围塑性损伤,新型柱展现出更为优异的损伤局部化特征;新型柱的塑性变形及损伤特征主要受轴压比控制,受位移影响较小。

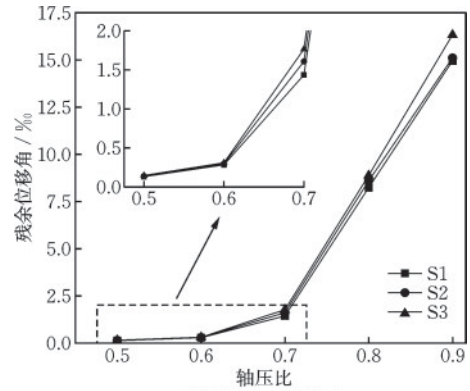
3.2 不同参数变化对新型柱性能的影响分析

由新型柱的基本性能分析可知,当轴压比超过 0.9 时,新型柱的各方面性能均会趋近固接柱,因此以下研究,轴压比取 0.9 以内。

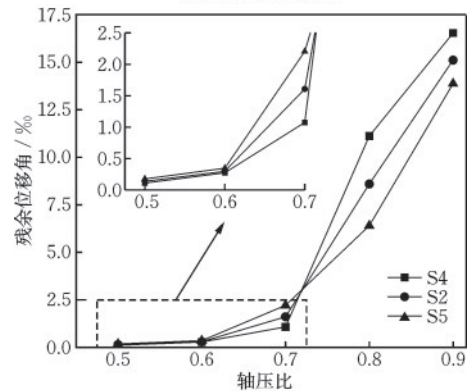
3.2.1 自复位性能分析

图 15 为不同工况的残余位移角与轴压比的关系曲线。

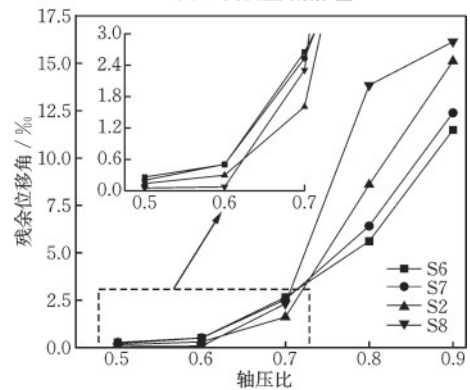
由图 15(a)可知,初始预应力值对残余位移的影响相对较小。相同轴压比条件下,残余位移角始终表现为:工况 S1<工况 S2<工况 S3,即柱子的残余位移随初始预应力值的减小而减小;



(a) 不同初始预应力



(b) 不同预应力筋数量



(c) 不同柱头尺寸

图 15 残余位移角-轴压比曲线

Fig.15 Residual displacement angle-axial compression ratio curves

由图 15(b)可知,预应力筋数量对残余位移的控制,在小轴压和大轴压下分别表现出了不同的变化规律。当轴压比在 0.7 以内时,残余位移角相对较小,三种工况的大小关系表现为:S5>S2>S4 最小,即残余位移随预应力筋数量的增多而加大。当轴压比超过 0.7 时,残余位移角增长迅速,以工况 S4 最为显著,明显超越了其他两个工况;而工况 S5 的残余位移角反而最小,此时,残余位移却随预应力筋设置数量的增多而减小。

由图 15(c)可知,柱头尺寸对残余位移的影响

规律也与轴压比的变化有着密切的关系。当轴压比小于0.7时,残余位移角基本遵循 $S6>S7>S2>S8$ 的变化规律;当轴压比增大到0.7时,工况S8的残余位移角增长较快,并超越了工况S2;随着轴压比的进一步增大,残余位移角为 $S8>S2>S7>S6$ 的关系。因此,当轴压较小时,残余位移随柱头尺寸的增大而减小,当轴压较大时,残余位移随柱头尺寸的增大而增大。

结合上述分析,得出柱子自复位性能受不同参数变化的影响规律。前述新型柱的自复位性能具有随轴压比增大而降低的特点,而初始预应力值、预应力筋设置数量以及柱头尺寸的参数变化均不能改变这一特点。初始预应力对新型柱的自复位性能影响较小,相同轴压条件下,随着初始预应力值的减小,柱子的自复位性能略有提升。新型柱的自复位性能受预应力筋数量和柱头尺寸影响较为明显,且影响规律与轴压比的变化密切相关,小轴压下,预应力筋数量越少、柱头越大,对自复位越有利;而大轴压下,预应力筋数量越多、柱头越小,对自复位越有利。

3.2.2 变形能力分析

图16中,当轴压比不小于0.7时,所有工况的水平变形能力包线均与工况S2基本重合。

如图16(a),当轴压比小于0.7时,工况S3的变形能力包线处于最内部,即变形能力最差,工况S1最好,S2次之,但整体差距不大。如图(b),三种工况的变形能力包线随轴压比的变化,呈现不同变化趋势,随着轴压比的增大,S5工况呈现向内收缩的趋势,S2工况表现出先收缩后扩张再收缩的复杂变化,而S5工况则呈现出向外扩张的趋势;变形能力具体表现为:当轴压比为0.5时,工况S2变形能力略强于另外两种工况;当轴压比小于0.5时,变形能力表现为S5最强、S2次之、S4最弱。如图16(c),工况S7、S2、S8的变形能力基本一致,而工况S6比这三种工况略差一些。

综上所述:当轴压作用较大时,初始预应力值、预应力筋数量及柱头尺寸的参数变化,对柱子的水平变形能力几乎没有影响。而当轴压比小于0.7时,柱子的变形能力受上述参数变化的影响才逐渐显现,具体规律如下:初始预应力越小,柱子的变形能力越强;随着预应力筋数量的增加,柱子的变形能力相应增强,且轴压比越小时增强越明显;柱头的设置有助于提升新型柱的变形能力,但柱头的尺

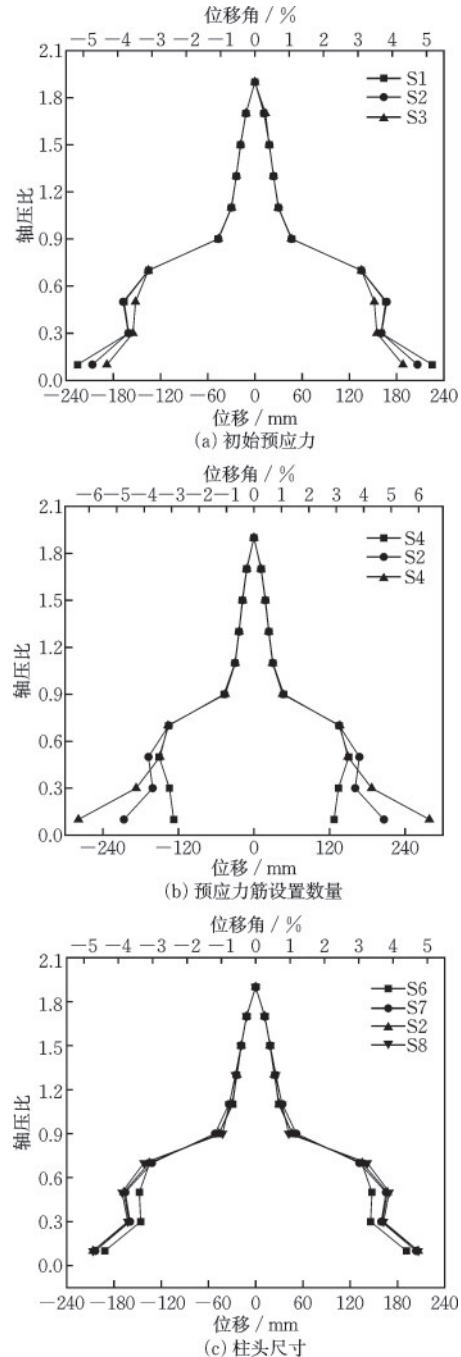


图16 水平变形能力包线对比图

Fig.16 Comparison of envelope curves of horizontal deformation capacity

寸变化对柱子变形能力的影响并不显著。

3.2.3 承载力分析

就影响程度而言,如图17所示,柱头尺寸变化对新型柱承载力的影响除在轴压比为0.9左右表现相对明显以外,在其他轴压比条件下表现均不突出;对于其他参数,无论是调整初始预应力值的还是改变预应力筋数量,对新型柱各轴压比情况的抗剪承载力影响能力都十分有限。

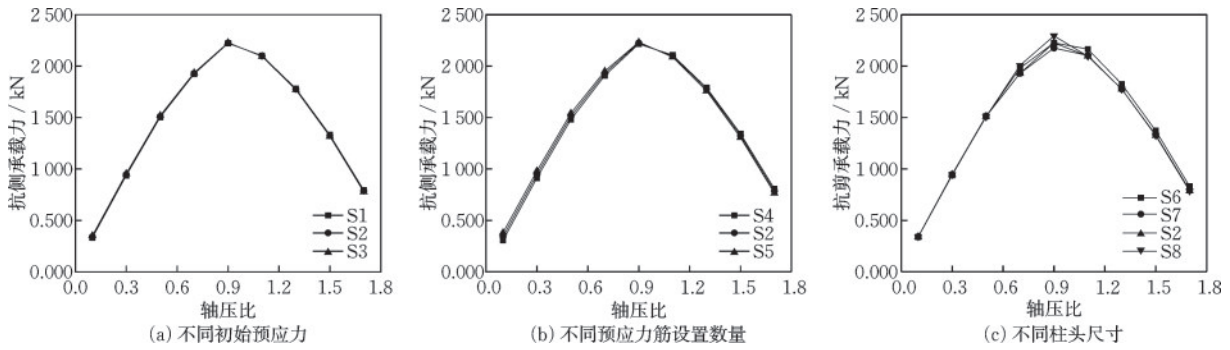


图17 承载力对比图

Fig.17 Comparison of bearing capacity

表4中展示了各工况下柱子承载力变化的详细情况。初始预应力以及预应力筋数量对承载力的影响规律如下:当轴压比不超过0.9时,新型柱的抗剪承载力随初始预应力的增大或预应力筋数量的增多而增大;而当轴压比超过0.9后,抗剪承载力反

而随初始预应力的增大或预应力筋数量的增多而减小。关于柱头尺寸对承载力的影响,数据表明:轴压比低于0.7时, $r=0.1$ 的柱头表现最优,承载力达到最大;当轴压比在0.7至0.9之间, $r=0.3$ 时,承载力最大;若轴压比超过0.9, $r=0$ 时,承载力最大。

表4 不同工况的抗剪承载力

Table 4 Shear bearing capacity under different conditions

轴压比	抗剪承载力/kN							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
0.1	331.61	341.25	350.70	306.59	379.99	338.72	342.51	341.14
0.3	936.50	945.86	955.11	911.80	980.52	938.65	947.27	943.76
0.5	1 503.23	1 511.44	1 519.44	1 480.51	1 542.24	1 513.17	1 515.11	1 507.15
0.7	1 923.66	1 929.67	1 935.55	1 908.15	1 950.84	1 979.90	1 929.39	2 006.95
0.9	2 222.04	2 225.10	2 228.01	2 215.10	2 233.16	2 226.47	2 175.59	2 294.72
1.1	2 101.44	2 097.95	2 094.74	2 106.51	2 087.72	2 164.88	2 103.22	2 095.89
1.3	1 781.04	1 775.30	1 769.54	1 790.37	1 759.03	1 824.38	1 776.21	1 775.74
1.5	1 331.19	1 323.18	1 316.63	1 342.10	1 304.67	1 371.51	1 330.26	1 325.55
1.7	794.82	786.03	777.37	806.97	764.04	830.99	795.05	784.47

4 结论

在地下结构中,传统固接柱中柱因变形能力较弱,故其地震损伤情况通常较为严重,并伴随明显的残余位移。为解决上述问题,本文提出了一种具有自复位功能的新中柱设计方案,适用于装配式地下框架结构。首先,对新中柱的变形恢复机制开展力学分析,证明方案的可行性;然后,采用ABAQUS有限元软件建立相应的三维结构模型,对其进行低周循环和静力推覆加载,并对比分析了新中柱与传统现浇中柱在残余位移、相对位移和承载力等关键性能指标上的差异;最后,重点关注了初始预应力值、预应力筋的配置数量和柱头尺寸

这三个关键设计参数,并系统阐述了这些参数变化对新中柱性能的影响情况,具体结论如下:

(1) 与传统固接柱相比,新中柱的抗剪承载力虽显著降低,但其自复位性能、水平变形能力以及损伤特征均得到明显改善。

(2) 随着水平加载位移及轴压比的增加,新中柱的自复位性能有所下降,但轴压影响更为显著。初始预应力值对自复位性能的影响较为有限,当初始预应力减小时,自复位能力略有提升;预应力筋数量及柱头尺寸对新中柱变形恢复能力影响则相对明显,且在不同轴压条件下影响规律呈相反变化:小轴压下,预应力筋数量越少、柱头尺寸越大,自复位性能越好;大轴压下预应力筋数量越多、柱头尺寸越小,自复位性能越好。

(3) 当轴压比较大时,新型柱的变形能力并不受初始预应力值、预应力筋数量及柱头尺寸这些参数变化的影响;当轴压比小于0.7时,参数变化对变形能力的影响规律如下:初始预应力越小、初始预应力筋数量越多,柱子的变形能力越强;而柱头的存在对提升柱子的变形能力具有积极作用,但其尺寸变化对变形能力影响并不显著。

(4) 随着轴压比的提高,新型柱的承载能力表现出先上升后下降的趋势,当轴压比达到0.9时,承载力达到峰值。然而,初始预应力值、预应力筋数量以及柱头尺寸的参数变化对抗剪承载力影响并不显著。

(5) 根据上述三种参数变化对新型柱性能的影响情况,推荐将初始预应力值取较小值,预应力筋数量和柱头尺寸可取适中值,即取初始预应力值500 MPa、预应力筋数量设置一排、柱头半径0.2 m作为新型柱的最佳参数组合。

参考文献:

- [1] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(4): 247-293.
- [2] Samata S, Ohuchi H, Matsuda T. A study of the damage of subway structures during the 1995 Hanshin-Awaji earthquake[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(3): 223-239.
- [3] 车爱兰, 岩榭敞广, 葛修润. 关于地铁地震响应的模型振动试验及数值分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1293-1298.
Che A L, Iwatate T, Ge X R. Dynamic behaviors of subway structure subjected to strong earthquake motions using shaking table tests and dynamic analyses [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1293-1298. (in Chinese)
- [4] 庄海洋, 王修信, 陈国兴. 软土层埋深变化对地铁车站结构地震反应的影响规律研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1258-1266.
Zhuang H Y, Wang X X, Chen G X. Earthquake responses of subway station with different depths of soft soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1258-1266. (in Chinese)
- [5] 黄莹, 陈国兴, 戚承志, 等. 可液化场地框架式地铁车站结构振动台模型试验与数值模拟的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 471-478.
Huang Y, Chen G X, Qi C Z, et al. Comparative analysis between shaking table model test and numerical simulation of frame subway station structure in liquefiable ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup2): 471-478. (in Chinese)
- [6] 王玉铃, 权登州, 柴少波, 等. 黄土场地地铁车站振动台试验方案设计与研究[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(1): 176-185.
Wang Y L, Quan D Z, Chai S B, et al. Study on the test scheme of shaking table test for subway station built in loess area [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2021, 16(1): 176-185. (in Chinese)
- [7] 权登州, 王玉铃, 柴少波, 等. 黄土场地条件下地铁车站诱导缝三维地震响应研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(2): 721-734.
Quan D Z, Wang Y L, Chai S B, et al. Seismic response analysis for induced joints of subway station in loess area [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(2): 721-734. (in Chinese)
- [8] 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 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, 69. (in Chinese)
- [9] 安林轩. 地铁车站结构中柱减震性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
An L X. Research on seismic performance of columns in metro station structure [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] 马超, 王作虎, 路德春, 等. CFRP加固地铁车站结构中柱地震损伤评价研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2249-2256.
Ma C, Wang Z H, Lu D C, et al. Seismic damage evaluation of CFRP-strengthened columns in subway stations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2249-2256. (in Chinese)
- [11] 邵文, 毛念华, 安秉忠, 等. 一种地铁车站抗震延性中柱: 中国, ZL201820795433.4 [P]. 2019-01-18.
- [12] 许紫刚. 地铁地下结构横断面抗震分析方法研究及减震技术初探[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
Xu Z G. Research on seismic analysis methods and preliminary study in seismic control technologies of subway underground structures in transverse cross section [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] 许成顺, 汪洋筱珊, 杜修力, 等. 分体柱在地下车站结构中的减震效果研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43

- (4): 624-633.
- Xu C S, Wang Y X S, Du X L, et al. Seismic mitigation effects of split columns in underground station structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 624-633. (in Chinese)
- [14] 路德春, 李强, 杜修力, 等. 基于失效模式控制的地铁车站结构抗震性能研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1400-1407.
- Lu D C, Li Q, Du X L, et al. Seismic performance of subway station based on failure model control[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1400-1407. (in Chinese)
- [15] Lu D C, Wu C Y, Ma C, et al. A novel segmental cored column for upgrading the seismic performance of underground frame structures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 131: 106011.
- [16] 陶连金, 安军海, 葛楠. 地铁车站工程应用双向RFPS支座隔震效果研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(1): 52-58.
- Tao L J, An J H, Ge N. Isolation effect analysis on bi-directional RFPS bearing applied in the metro stations engineering[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 36(1): 52-58. (in Chinese)
- [17] 陈文斌, 庄海洋, 李晟, 等. 基于柱顶隔震的3层3跨地铁地下车站结构抗震性能研究[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(1): 146-156.
- Chen W B, Zhuang H Y, Li S, et al. Seismic performance of the three-layer three-span subway underground station structure with seismic isolation bearings fixed on the top of columns[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2021, 16(1): 146-156. (in Chinese)
- [18] 杜修力, 许紫刚, 许成顺, 等. 摩擦摆支座在地下地铁车站结构中的减震效果研究[J]. 工程力学, 2019, 36(9): 60-67, 88.
- Du X L, Xu Z G, Xu C S, et al. Seismic mitigation effect analysis on friction pendulum bearing applied in the underground subway station[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(9): 60-67, 88. (in Chinese)
- [19] Chen Q J, Wang Y C, Zhao Z P. A novel negative stiffness amplification system based isolation method for the vibration control of underground structures[J]. Applied Sciences, 2020, 10(16): 5421.
- [20] Wang Y C, Chen Q J, Zhao Z P, et al. Multi-location seismic isolation approach and design for underground structures employing the negative-stiffness amplification system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 122: 104395.
- [21] 于仲洋, 张静堃, 邱艳佳, 等. 叠合装配式地铁车站结构地震动力响应及减震措施研究[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(4): 235-244.
- Yu Z Y, Zhang J K, Qiu Y J, et al. Study on seismic dynamic responses and damping measures of the superimposed prefabricated subway station structure[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2023, 43(4): 235-244. (in Chinese)
- [22] 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 (Technologica), 2022, 52(10): 1469-1483. (in Chinese)
- [23] Mikami A, Konagai K, Sawada T. Stiffness design of isolation rubber for center columns of tunnel[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2001, 682: 415-420.
- [24] 杜修力, 王子理, 刘洪涛. 基于韧性设计的一种地下框架结构抗震新体系研究[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(3): 493-501.
- Du X L, Wang Z L, Liu H T. Study of a seismic new system of underground frame structure based on toughness design [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(3): 493-501. (in Chinese)
- [25] 阴孟莎. 柱脚可更换式地铁车站抗震性能分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- Yin M S. Seismic performance analysis of subway station with replaceable column feet[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [26] 王高凤. 地下车站摇摆—自复位中柱影响因素与抗震性能研究[D]. 郑州: 河南大学, 2021.
- Wang G F. Research on the influence factors and seismic performance of rocking self-centering central column in underground station[D]. Zhengzhou: Henan University, 2021. (in Chinese)
- [27] Chen Z Y, Zhou Y. Seismic performance of framed underground structures with self-centering energy-dissipation column base[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(13): 2809-2822.
- [28] Wang Y C, Chen Q J, Zhao Z P, et al. A resilient column with angular friction damper for seismic performance upgrading of underground structures[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 116: 104085.

(本文编辑: 苏泽云)