

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230618001

基于部分装配式的隔震地铁车站结构性能研究*

卢广¹, 庄海洋^{1,2}, 李晟¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对中柱、中板及纵梁等内部构件是双层地铁车站结构抗震性能的薄弱环节, 提出了一种外部现浇和内部装配的震后可更换新型隔震地铁车站结构形式, 建立了考虑部件装配与支座隔震的三维精细化有限元模型, 分析了新型地下车站结构的抗震性能。研究表明: 在输入峰值加速度小于 $0.2g$ 时, 外部现浇和内部装配的车站结构层间位移角完全满足规范规定的弹塑性限值; 与整体现浇结构相比, 新型车站结构的纵梁、中板和中柱处的地震损伤有明显减小, 中板与中柱底端接触部位的地震损伤也有所缓解; 外部现浇和内部装配的车站结构在顶底板截面及侧墙的弯矩幅值有小幅增加。总体来看, 外部现浇和内部装配的新型设计方法能够有效提高地铁地下结构的整体抗震性能水平和震后可快速修复性。

关键词: 地铁车站结构; 部分装配式; 隔震支座; 地震反应; 减震效能

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1212-10

Seismic Performance of Metro Station Structures Based on Partial Prefabrication

LU Guang¹, ZHUANG Haiyang^{1,2*}, LI Sheng¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Given that the internal components such as middle columns, middle plates, and longitudinal beams are the weak points in the seismic performance of double-layer metro station structures, a new metro station structure with external cast-in-place and internal prefabricated components, which could be replaced after an earthquake, was proposed. A three-dimensional refined finite element model considering component prefabrication and seismic isolation bearings was established to analyze the seismic performance of the new underground station structure. The results showed that when the input peak acceleration was less than $0.2g$, the inter-story drift angle of the station structure with external cast-in-place and internal prefabricated components fully complied with the code-prescribed elastoplastic limits. The seismic damage at the longitudinal beams, middle plates, and middle columns of the new station structure was significantly reduced compared with fully cast-in-place station structures, and the seismic damage at the contact part between the middle plate and the middle column base was alleviated. The bending moment amplitude in the top-bottom plate sections and side walls of the new station structure slightly increased. On the whole, the new design method with external cast-in-place and in-

* 收稿日期: 2023-06-18; 修回日期: 2023-08-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978333)资助

作者简介: 卢广(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事地铁地下车站结构抗震性能研究。E-mail: 1729085429@qq.com

通信作者: 庄海洋(1978—), 男, 教授, 博士。主要从事地下结构防震减灾研究。E-mail: zhuang7802@163.com

ternal prefabricated components can effectively improve the overall seismic performance of underground metro structures and their rapid post-earthquake repair capabilities.

Keywords: metro station structure; partial prefabrication; seismic isolation bearing; seismic response; vibration reduction efficiency

0 引言

随着城市交通线网建设的推进和地铁交通的日益发达,越来越多的城市已进行或规划进行地铁线路建设。受到人口集聚效应的影响,中心城市每日乘坐城市轨道交通的人数呈指数型增长,单层地铁车站已无法满足居民日益增长的工作出行要求。因此在大中型城市中,双层及多层地铁地下车站结构越来越受到城市规划者的欢迎。而传统整体现浇结构施工周期较长、现场现浇作业要求较高,且易产生大量建筑附属垃圾。同时,在力学性能方面,国内外众多学者也针对其抗震性能进行了研究^[1-2],发现对于传统整体现浇的双层及复杂地下车站,中板及中柱为典型易受损部件^[3]。且由于传统车站结构内部构件均为现场浇筑,发生地震后难以进行有效修复,构件可替代性、可恢复性也有待改进。因此,开展装配式地铁地下车站结构设计及其防震韧性的研究尤为重要。

装配式结构体系采用的工厂预制构件结构与局部现浇相结合的施工模式,规避了传统完全现浇工法的缺点,顺应了“建筑工业化、产业化”的大政方针,在提高建筑质量及建设效率方面拥有明显优势。而对于装配式地下结构的研究现状而言,虽然已有少量相关研究且在我国长春和无锡等城市有相关工程建设案例,但是还缺少对预制装配式地铁地下车站结构的抗震性能进行专门的研究,尤其缺少对可恢复功能性地下结构防震体系的研究。已有的相关研究也仅是对具体建设的结构进行专门的抗震分析,例如,陶连金等^[4-6]基于大型有限元软件ABAQUS对长春全国首例全预制装配式地铁车站成环后力学性能和整体抗震进行了研究,分析表明:装配式车站结构的力学与变形性能均符合现行设计规范要求;杜修力等^[7-8]对北京地铁六号线西延线金安桥站中部分区间采用的整体装配式结构进行了抗震性能研究,该站是部分区段采用整体装配式结构修建,车站标准段为双层双柱三跨箱型结构型式,装配式构件为工厂预制、节点采用套筒灌浆

方法连接,力求达到全现浇钢筋混凝土结构整体性的效果;本文作者所在的课题组以无锡地铁S2号线南门地铁车站结构为研究对象,重点分析了部分装配式地下结构的整体抗震性能,揭示了部分装配式地下车站结构抗震性能的优缺点^[9-10]。但是,上述少数学者开展的装配式地铁地下车站结构抗震性能的研究主要针对特定的装配式地铁地下车站结构展开的,未能形成装配式地铁地下车站结构抗震性能与评价体系的系统研究成果,研究发现和结论还不具有普适性。

因此,为进一步探明装配式结构的抗震性能,本文利用ABAQUS软件对附带隔震支座的外部现浇和内部完全预制装配的新型地下车站结构开展了抗震性能研究。通过分别建立传统整体现浇车站结构及外部现浇和内部装配的车站结构的三维土-结构相互作用有限元模型,对比分析不同地震强度下两种结构的侧向变形、地震损伤和内力幅值等结构地震响应因素,验证了此新型地下车站结构具有较优异的抗震性能。本文可为可恢复功能性地下结构防震体系的研究和实际工程建设提供参考。

1 数值分析模型及方法

1.1 部分装配式地下车站结构概况

本文以原型为南京地区如图1(a)所示的两层三跨地下车站开展研究,也为目前常用的地铁车站结构形式,庄海洋等^[11-12]已针对其开展了一系列数值模拟及振动台试验研究。车站主体结构横截面宽度21.2 m,高度12.49 m,顶板、中板及底板厚度分别为0.7、0.35、0.8 m,结构上层侧墙厚度为0.7 m,下层侧墙厚度为0.8 m,中柱直径为0.8 m,纵向两柱间距9.12 m。车站采用的地下连续墙宽度为1.2 m,地连墙嵌入深度与车站结构高度之比为1:1,地连墙与车站结构侧墙之间采用叠合墙的连接模式。车站结构与地下连续墙均采用Q235钢筋,其主要配筋情况如图1(b)所示。

地铁车站采用外部现浇、内部装配的新型装配式结构形式,其主要由包括地连墙的外侧现浇段与

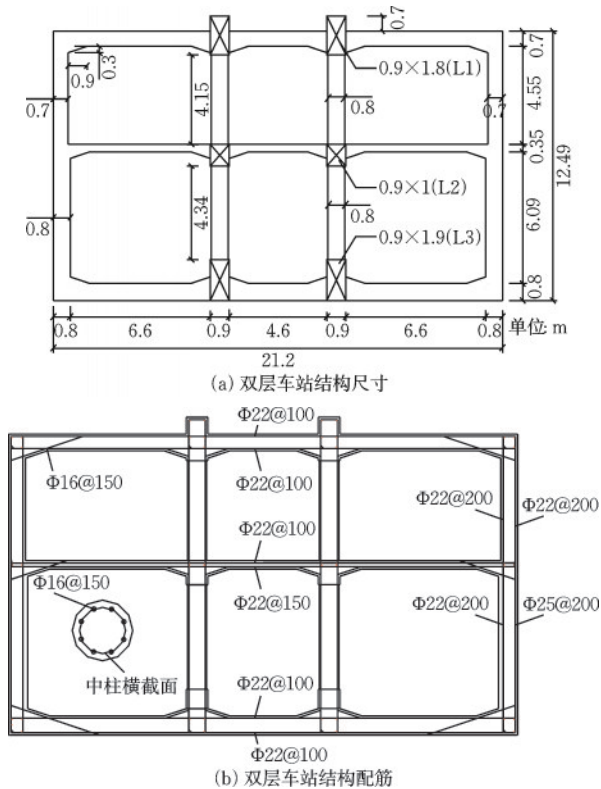


图1 双层车站结构的尺寸及配筋示意
Fig.1 Schematic diagram of dimensions and reinforcement details of double-layer station structure

内侧预制构件组合而成,外侧现浇段采用C30混凝土,内侧工厂预制件采用C40高标号混凝土。如图2所示,装配式构件进行施工时,整体上采用预留钢筋孔+砂浆灌注的工法,即以灌注砂浆孔嵌套,将工厂预制件与现浇构件拼装地严丝合缝,从而使结构具有较好的力学强度和工作性能。为方便车站的搭接与施工,预制中板设置了侧板A及中间跨中板B两种类别,板端均设置了预留钢筋,施工时通过在接缝处浇筑C40砂浆粘结在一起。在装配式中柱

的两端同样预留露头钢筋,方便后续将钢筋插入上下部件的预留孔里面。由于车站结构内部构件均为预制件,后期出现损毁可方便进行灵活更换,侧墙及顶底板可通过植筋等方式进行加固,具体构造细节和施工工法见文献[13]。

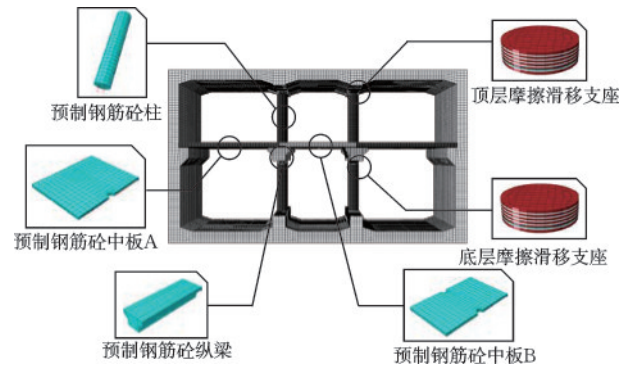


图2 外部现浇和内部装配的新型车站结构
Fig.2 New station structure with external cast-in-place and internal prefabricated components

1.2 土与钢筋混凝土材料的动力本构及接触

本文采用庄海洋等^[14-15]利用Fortran自行编译的软土嵌套面本构模型,此本构已应用于各种复杂工程工况的土体模拟,并在模拟土体的非线性地震响应上表现出了优异的适用性。土体力学参数见表1。混凝土采用由J.Lee等^[16]给出的循环拉压本构模型,该本构模型基于脆性断裂能原理并采用多个混凝土硬化参数对材料的屈服进行修正,能较好地模拟混凝土的受拉受压损伤状态。钢筋则采用线弹性本构模型,弹性模量为210 GPa。混凝土材料阻尼比取为2%,土体材料阻尼比取为3%^[14]。

有限元模型中土-结构相互作用的动力接触特

表1 南京地区双层车站土层的主要物理力学参数

Table 1 Key physical and mechanical parameters of soil layers in double-layer stations in Nanjing

编号	土性	重度/(kN·m ⁻³)	剪切波速/(m·s ⁻¹)	厚度/m	动泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	素填土	1 840	140.0	3.0	0.49	13.5	16
2	黏土	1 900	152.7	6.0	0.49	15.4	26
3	粉细砂	2 050	167.1	6.0	0.49	7.0	30
4	黏土	1 940	158.5	8.0	0.49	18.8	16
5	中砂	2 090	172.7	7.0	0.49	5.0	28
6	中砂	2 120	205.8	10.7	0.49	5.0	30
7	粉质黏土	1 890	236.3	10.7	0.49	12.3	28
8	砂土	2 050	263.2	13.5	0.49	6.2	30
9	老黏土	1 930	491.6	15.0	0.49	21.0	21

性采用主从面(Master-slaver-surface)来定义,切向接触在Penalty准则下通过剪应力来求解,当剪应力大于静摩擦应力时,接触面间将在外力的作用下发生一定量的位移,土体与混凝土结构间的摩擦系数取为0.4^[17]。在法向接触方面,运用“Hard”接触进行近似等效,即拉应力将使得体系立即分离,从而模拟在地震荷载作用下车站与土体互相脱落的情况。

1.3 三维摩擦滑移支座力学性能及参数

摩擦滑移支座主要由顶底支撑板、复合钢板和滑板构成(如图3所示)。该类支座主要通过不锈钢板与滑板之间的摩擦与相对滑移来实现隔震体系的水平剪切错动,最终起到减震耗能的作用。

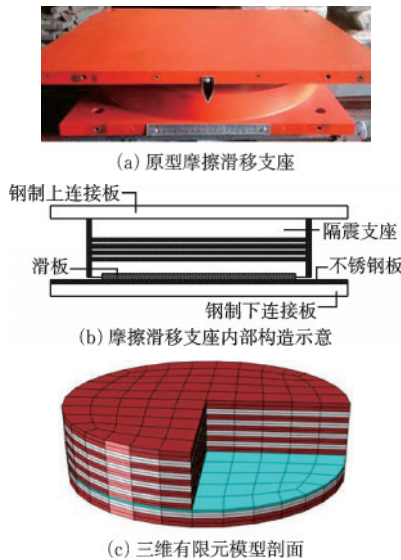


图3 铅芯橡胶隔震支座示意

Fig.3 Schematic diagram of lead-rubber seismic isolation bearings

滑板材料为聚四氟乙烯并假设其为理想弹塑性材料,聚四氟乙烯的屈服剪应力一般在20~40 MPa之间,本研究中滑板材料的屈服剪应力取为25 MPa,弹性模量 $E=280$ MPa,泊松比 $\nu=0.39$ 。摩擦滑移支座的上下连接板、上下封板、内部薄钢板均采用Q235钢材,滑移支座中的钢板一般很难达到屈服强度,因此钢板使用线弹性本构,弹性模量 $E=200$ GPa,泊松比 $\nu=0.3$ 。由于支座内部叠层钢板与滑板间通过热硫化融为一个整体,故滑移支座的叠层钢板之间、上部叠层钢板与滑板之间均通过“Tie”约束来模拟。滑板与底层钢板间的接触面的摩擦滑移通过定义“Surface-to-surface”接触来允许两者间的震时相对运动。在法向方向上两者不会发生相互侵入且一旦受拉即相互分离,因此

将其定义为“Hard”接触;切向上服从库伦定律,根据H.Y.Zhuang等^[18]的研究可知,摩擦滑移支座中滑板与底板间的摩擦系数约为0.025。

1.4 有限元模型的建立

为准确模拟结构的地震响应,本研究采用庄海洋等^[19-20]建立的土-结构动力相互作用的静、动力耦合时程分析方法。在静力分析中采用“滚轴边界”,限制底部的位移及转动并将其假定为基岩面,侧方竖向不设限使其得以发生自然沉降;动力分析中,模型基岩处竖向固定,同时依据时程施加地震荷载,左右边界利用弹簧提供反力限制土体扩张。此外,根据楼梦麟等^[21]的理论推导,场地与结构宽度之比需大于5倍,方可最大程度地消除场地截取的影响。本文车站结构的宽度为21.2 m,因此将土体的宽度取200 m。根据庄海洋等的前期分析^[11],地铁车站的土层深度取80 m,厚度为9.12 m,如图4所示。

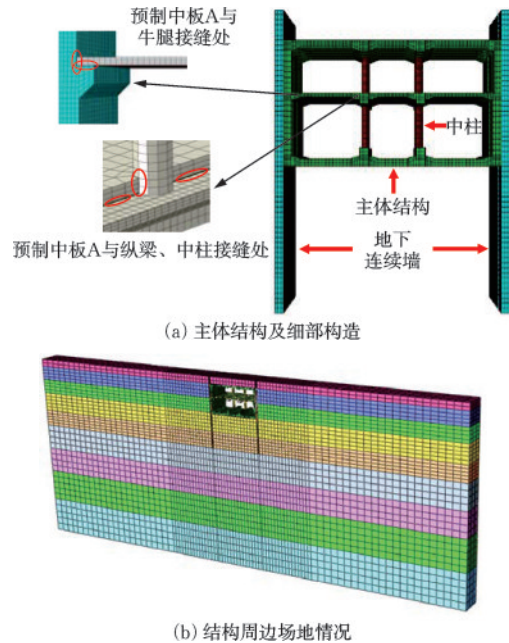


图4 土-部分装配式主体结构相互作用体系有限元模型
Fig.4 Finite element model of soil-partially prefabricated main structure interaction system

模型中土体及混凝土结构均采用三维八节点缩减积分单元(C3D8R),钢筋采用三维杆单元(T3D2),土体单元尺寸介于1~2 m,混凝土网格尺寸为0.2 m,钢筋单元尺寸为0.2 m。钢筋运用“Embedded Region”嵌入混凝土结构中,预制钢筋混凝土中板A及中板B拼装过程中,利用“Merge Geometry”功能,将中板的接缝部位合并在一起。中板与牛腿间、中板与侧墙间均采用“Tie”连接近似模拟

灌浆浇筑后紧密贴合、不可分离的情况。此外,地连墙与结构侧墙之间亦用“Tie”连接来模拟叠合墙式的连接方式。为控制变量和方便后续对比,外部现浇和内部装配的地铁车站与传统车站结构的层高、跨间距完全相同。

本研究根据输入地震峰值加速度(PGA)与峰值速度(PGV)比值得到的振动频率,选择了卧龙波(高频地震动)、Kobe波(中频地震动)、El-Centro波(中频地震动)和什邡八角波(低频地震动)四条典型地震波^[22]。通过在模型土体底部输入地震动,模拟地震从基岩面输入然后在土体中传播。这里定义了基岩地震动(PBA)来衡量初始地震动的大小,且对照规范要求,将其峰值统一调整为0.05g、0.1g、0.2g、0.3g、0.4g、0.5g六类不同的工况,从而反映地下结构在外部荷载逐渐加大过程中的体系化地震反应。

2 计算结果分析

2.1 车站结构相对层间位移角

图6为传统整体现浇结构与外部现浇和内部装配的新型车站结构的层间位移角结果对比,其计算方法如图5所示。由图6的结果可知,由于在两层装配式中柱顶部安装了摩擦滑移支座,因此外部现浇和内部装配的车站结构的层间位移角呈现出轻微的增大趋势。以Kobe波为例,当地震动处于0.05g及0.1g地震作用时,两种车站结构层间位移角相差不大,当逐步增大到0.3g地震作用时,摩擦滑移支座开始逐渐发挥作用,使中柱与结构间的相互牵拉作用减弱,从而加大了结构侧墙的位移反应。需要注意的是,在0.4g、0.5g地震动下,两种车站结构的层间位移角出现了略微减小。这应与软土地基的非线性变形有关,在剧烈地震荷载的作用

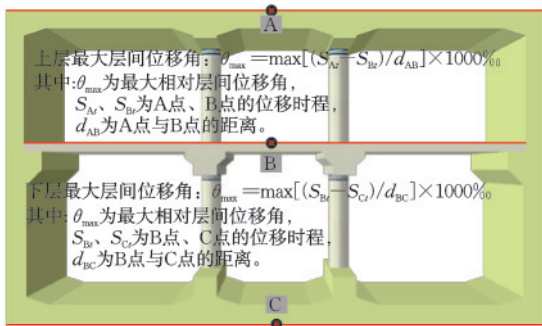


图5 最大相对层间位移角计算示意

Fig.5 Calculation of maximum relative inter-story drift angles

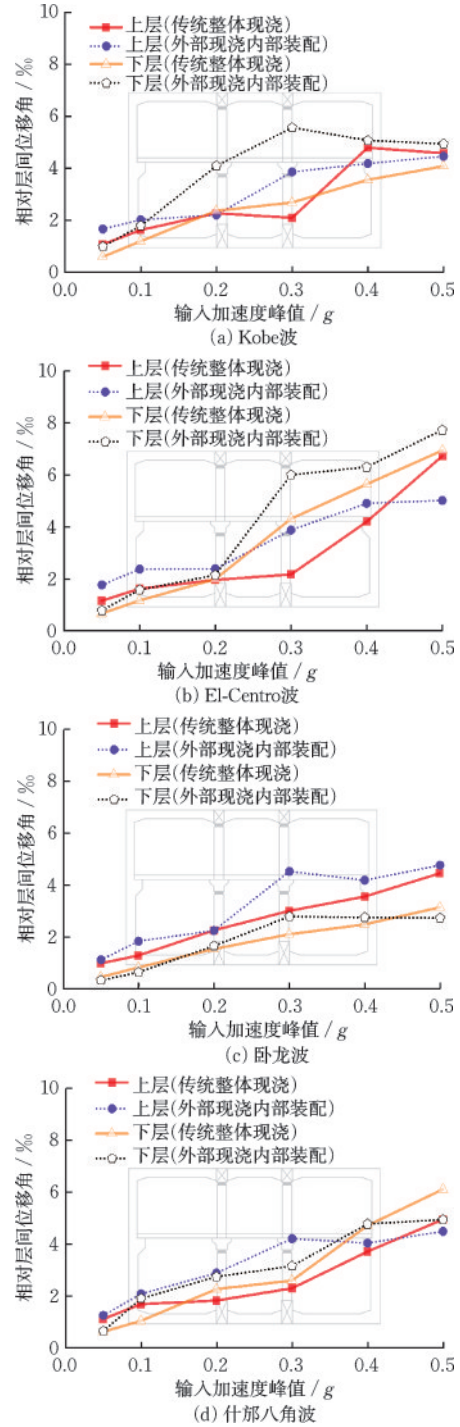


图6 车站结构的层间位移角

Fig.6 Inter-story drift angles of station structure

下土体强度弱化剧烈,造成地基填土因软化而丧失力学性能,从而形成了天然的隔震土层,对车站结构的侧向变形起到了一定的保护作用。

本文采用的原型地铁车站属于7度设防,基本加速度值为0.1g。结合《地下结构抗震设计标准》^[23]中6.9.2条可知,在四条地震波峰值加速度小于等于0.2g时,除输入峰值加速度为0.2g的Kobe波工况,

外部现浇和内部装配的车站结构的层间位移角均小于弹塑性限值1/250,证明外部现浇和内部装配的车站结构完全符合规范规定的层间位移角要求,车站结构并未遭受不可恢复的塑性变形。

2.2 车站主体结构地震损伤

图7给出了0.3g的Kobe波作用下传统整体现浇结构与外部现浇和内部装配的新型车站结构受拉损伤云图对比(DAMAGET代表混凝土材料受拉损伤因子,当因子接近于1时表示混凝土材料趋于完全受拉破坏)。

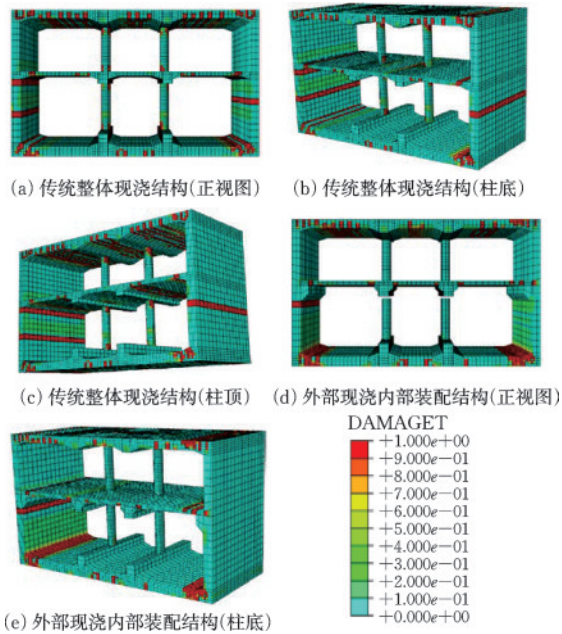


图7 车站主体结构受拉损伤云图($PBA=0.3g$)

Fig.7 Tensile damage contour maps of station main structure ($PBA=0.3g$)

Kobe波 $PBA=0.3g$ 工况中,三维整体现浇结构与外部现浇和内部装配的新型车站结构的外侧框架位置都出现了一定规模的受拉损伤。此外,传统完全现浇车站结构的中柱与中板、纵梁连接处出现显著的张拉破坏,尤其在顶层柱底与中板搭接处出现了整体性的混凝土溃损。相比于传统整体现浇结构,外部现浇和内部装配的新型车站结构的中柱未出现明显地震损伤,结构纵梁、中板及侧墙下方的结构损伤情况明显减轻。出现这样的原因应是:在地震荷载作用下,由于传统整体现浇结构的中柱与结构间的刚性约束,中柱在左右摇摆变形的过程中对主体结构中板及纵梁有一定的牵拉作用,使中柱发生左右形变的过程中易发生应力集中而产生

损伤。而外部现浇和内部装配的新型地铁车站结构摩擦滑移支座的设置,使中柱柱端约束打开,从而减小了新型地铁车站结构的中柱及中板的地震损伤。同时由于地铁车站内部刚性约束的打开,外部现浇和内部装配的新型车站结构的底板端部的受拉损伤区域略大于传统整体现浇结构。

图8给出了0.5g的Kobe波作用下传统整体现浇结构与外部现浇和内部装配的新型车站结构受拉损伤云图对比。在Kobe波 $PBA=0.5g$ 工况中,传统整体现浇结构与外部现浇和内部装配的新型车站结构的受拉破坏都明显加重,顶板两侧边跨近乎全跨、底板两侧边跨超过半跨出现大型张拉裂缝,且侧墙上下部位亦呈现了贯穿纵断面的红色剧烈破坏区域。传统整体现浇结构柱端破坏显著加剧,出现了大范围贯穿横截面的地震受拉损伤,左侧墙下部也出现了大范围的受拉破坏。而外部现浇和内部装配的车站结构各层中柱柱端仍处于较完好的性能状态,其中板中间跨处的地震损伤有明显减轻,顶层中柱端部与中板连接处的应力集中也得到缓解。同时由于内部装配式结构的中板、纵梁采用C40高等级预制构件,其强度及力学性能均明显优于C30,再加上两侧牛腿的设置使得该部位的侧墙抗弯变形增强,导致中板承担了更多该部位节点的变形,使得侧墙部位的地震损伤亦有显著改善。

已有研究表明,地下结构的受压垮塌主要是由

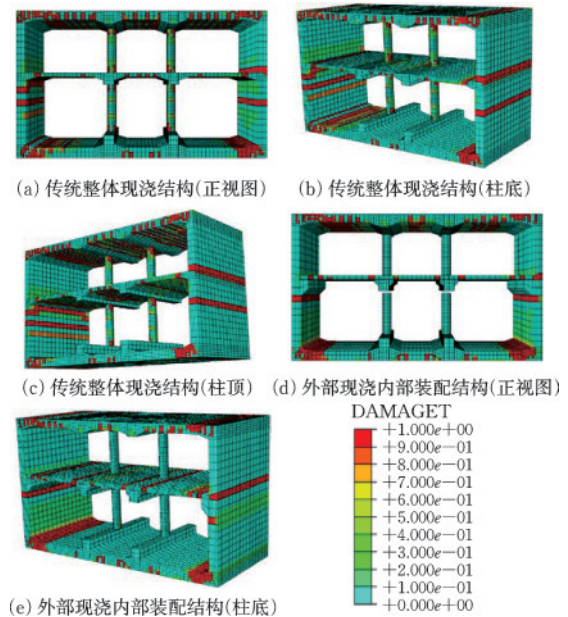


图8 车站主体结构受拉损伤云图($PBA=0.5g$)

Fig.8 Tensile damage contour maps of station main structure ($PBA=0.5g$)

于中柱在高轴压比下其端部发生大范围的混凝土压碎破坏,进而导致顶板的整体竖向坍塌^[2]。如图9所示,在 Kobe 波 0.5g 下的结构受压损伤云图中 (DAMAGEC 代表混凝土材料受压损伤因子,当因子接近于1时表示混凝土材料趋于完全受压破坏),对传统整体现浇结构而言,其顶层中柱均因受压而呈现了大面积的地震破坏,尤其是在柱端处已经出现了贯穿截面的受压破坏,这表明双层中柱已经丧失了自身承载能力,在地震荷载的作用下极易造成纵梁、顶板的坍塌破坏,最终使整个地铁车站结构丧失承载能力。对于外部现浇和内部装配的新型隔震车站结构而言,无论是顶层中柱还是底层中柱均未出现明显的地震受压破坏,仅在底层中柱下端出现极为轻微的损伤区域,这表明外部现浇和内部装配的隔震车站结构在强震作用下仍具有保证顶层中柱的完整性与安全性的优异性能。

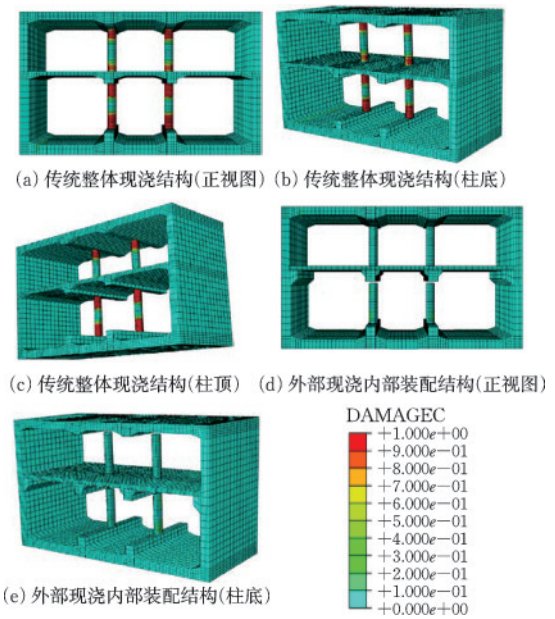


图9 车站主体结构受压损伤云图($PBA=0.5g$)

Fig.9 Compressive damage contour maps of station main structure ($PBA=0.5g$)

2.3 结构中柱关键节点动应力反应

为进一步分析外部现浇和内部装配的新型隔震车站结构的受力特性,图10给出了0.5g的 Kobe

波作用工况下,两种三维结构在外侧框架及中柱关键截面处的内力幅值、时程曲线和各部件截面的隔

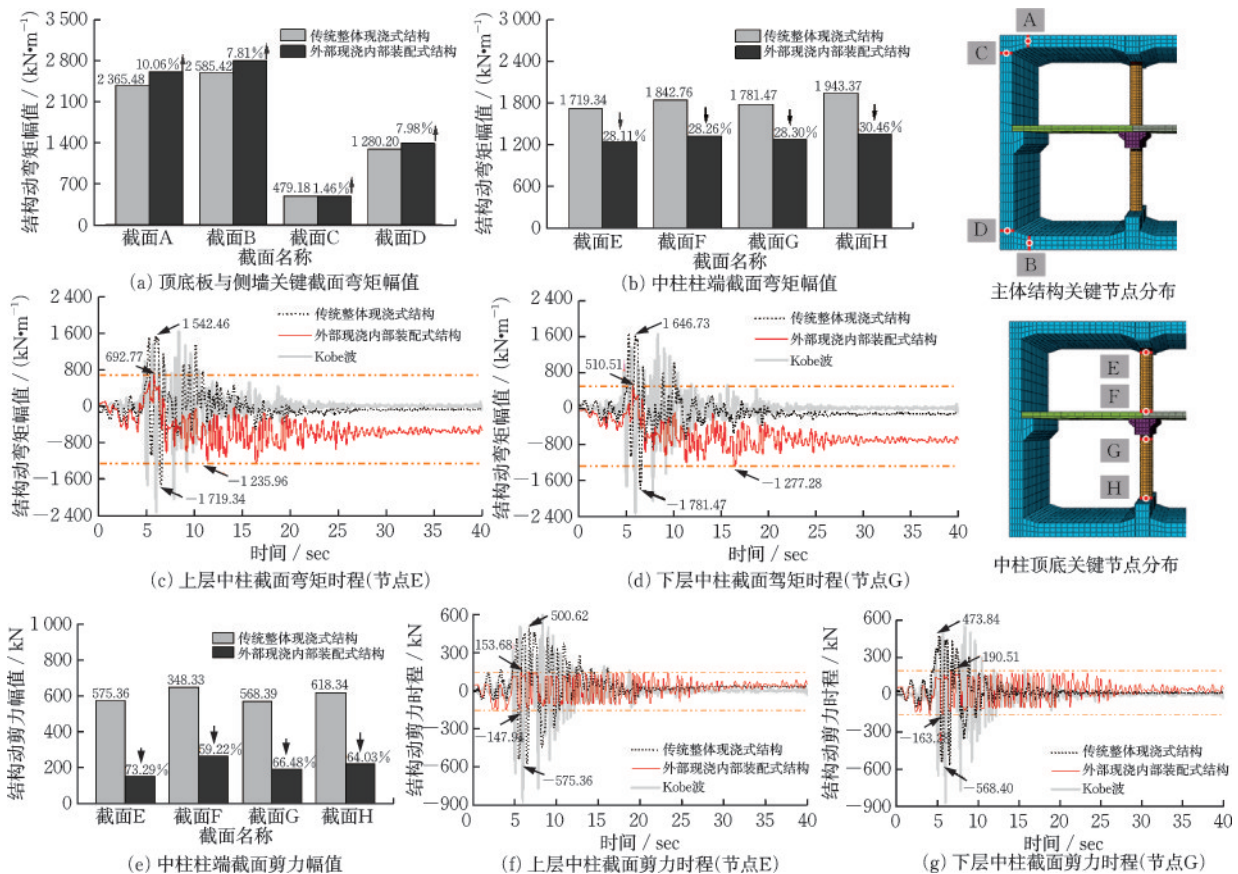


图10 车站结构关键截面动应力反应时程曲线($PBA=0.5g$)

Fig.10 Time-history curves of dynamic stress response at key sections of station structure ($PBA=0.5g$)

震效率。

外部现浇和内部装配的新型车站结构的中柱柱端截面的弯矩与剪力幅值相较于传统整体现浇结构显著降低,其中截面E~截面H的弯矩的隔震效率为28%~30%,剪力的隔震效率为60%~73%。但外部现浇和内部装配的车站结构顶底板与侧墙端部的截面弯矩幅值相较于传统整体现浇结构略微有所增加,增幅为2%~10%。总体而言,外部现浇和内部装配的新型隔震车站结构表现出良好的减隔震效能。这应是高编号混凝土强度及浇筑的构件刚度较大,地震时将变形更加集中在隔震支座部位,从而提高结构的隔震消能,使结构中柱在强地震作用下始终处于较低内力水平的安全状态,从而提高双层地下车站结构的整体抗震性能水平。而摩擦滑移支座的设置也会削弱车站结构的整体抗侧能力,导致外部现浇和内部装配的车站结构的整体侧移相较于传统整体现浇结构有所增大,从而一定程度上增加了其顶底板与侧墙端部的内力幅值。鉴于此,在外部现浇和内部装配的车站结构施工中采用减隔震措施时,建议在车站结构顶底板与侧墙端部等不利部位采取增加配筋等加固措施。

3 结 论

针对中柱、中板及纵梁等内部构件是地铁车站结构抗震性能的薄弱环节,及传统整体现浇车站结构在地震受损后内部构件更换困难,地震过后维修耗费大的现状,本文提出了一种外部现浇和内部装配的新型隔震地铁车站结构,建立了土-两层三跨地铁车站结构静、动力耦合有限元模型,对比分析了传统现浇车站与外部现浇和内部装配的新型隔震车站结构的地震反应及其损伤的影响规律,主要结论如下。

(1)在外部现浇和内部装配的新型隔震地铁车站结构中,摩擦滑移支座的应用使结构的抗侧移刚度及顶底板的抗屈曲刚度略有下降,致使层间位移角幅值略有上升。在四条地震波峰值加速度小于等于 $0.2g$ 时,除在输入峰值加速度为 $0.2g$ 的Kobe波工况,新型车站结构的层间位移角均小于《地下结构抗震设计标准》^[23]的弹塑性限值 $1/250$,外部现浇和内部装配的新型隔震车站结构完全符合规范规定的层间位移角要求。

(2)因外部现浇和内部装配的新型隔震地铁车站结构中柱的约束改变,其纵梁、中板处的地震损伤与传统车站结构相比有明显减小;同时摩擦滑移支座的设置改变了车站结构的受力特性,中柱顶底部在地震中受到的复杂拉、压、扭转作用明显减轻,使得中柱柱顶几乎不受明显的地震损伤,中板与中柱柱底接触部位的地震损伤也有明显缓解,这表明外部现浇和内部装配的新型隔震地铁车站结构在整体上具有更强的抗震能力。

(3)外部现浇和内部装配的新型地铁车站结构顶底层中柱的内力幅值相比于传统整体现浇车站结构均有较为明显的减小,外部现浇和内部装配的新型地铁车站结构较好地保护了中柱不受地震动力损伤,使车站结构在地震荷载作用下具有更高的体系安全性能,同时兼备震后可快速更换修复性。

参考文献:

- [1] 罗永鸿,张梓鸿,许成顺,等.基于Pushover分析方法的多层地铁车站地震反应研究[J].震灾防御技术,2022,17(1):143-153.
Luo Y H, Zhang Z H, Xu C S, et al. Research on seismic response of multi-story subway station based on pushover analysis method [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2022, 17(1): 143-153. (in Chinese)
- [2] 李洋,许成顺,杜修力.阪神地震中大开地铁车站和区间隧道破坏差异成因研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(3):326-336.
Li Y, Xu C S, Du X L. Causal analyses of different degree of earthquake damage occurred on Daikai subway station and its running tunnels during Kobe earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(3): 326-336. (in Chinese)
- [3] 许紫刚,郑养宁,庄海洋,等.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[J].防灾减灾工程学报,2024,44(6):1359-1367.
Xu Z G, Zheng Y N, Zhuang H Y, et al. Study on the seismic performance of subway station structures with split columns based on different analysis methods [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(6): 1359-1367. (in Chinese)
- [4] 陶连金,李卓遥,杨秀仁,等.基于ABAQUS的预制装配式地铁车站结构拼装成环后力学行为研究[J].现代隧道技术,2018,55(5):115-123.
Tao L J, Li Z Y, Yang X R, et al. Three-dimensional

- dynamic response analysis of a single-ring structure in a prefabricated subway station[J]. *Soil Sustainable Cities and Society*, 2018, 55(5): 115-123. (in Chinese)
- [5] Ding P, Tao L J, Yang X R, et al. Shaking table test of a multi-story subway station under pulse-like ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 45: 271-286.
- [6] 丁鹏,陶连金,杨秀仁,等. 预制装配式地铁车站单环结构传力与变形机理[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(5): 1076-1084.
Ding P, Tao L J, Yang X R, et al. Force transfer and deformation mechanism of single ring structure of prefabricated subway station[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(5): 1076-1084. (in Chinese)
- [7] 杜修力,刘洪涛,路德春,等. 装配整体式地铁车站侧墙底节点抗震性能研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(4): 38-47.
Du X L, Liu H T, Lu D C, et al. Study on seismic performance of sidewall joints in assembled monolithic subway station[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2017, 50(4): 38-47. (in Chinese)
- [8] Du X L, Liu H T, Xu C S, et al. Experimental study on seismic performance of precast column in assembled monolithic subway station under different axial compression ratio[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39: 11-19.
- [9] 郭建刚,王永伟,庄海洋,等. 部分预制装配式地铁地下车站结构整体抗震性能研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(5): 215-224.
Guo J G, Wang Y W, Zhuang H Y, et al. Seismic performance of an underground subway station with some sectional prefabricated members[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2021, 41(5): 215-224. (in Chinese)
- [10] 丁录董,徐军林,庄海洋,等. 预制+现浇装配式地铁地下车站结构地震反应的三维有限元分析[J]. *世界地震工程*, 2021, 37(4): 157-166.
Ding L D, Xu J L, Zhuang H Y, et al. 3-D numerical modelling on the seismic responses of an underground subway station with some sectional prefabricated members[J]. *World Earthquake Engineering*, 2021, 37(4): 157-166. (in Chinese)
- [11] 庄海洋,王雪剑,王瑞,等. 土-地铁动力相互作用体系侧向变形特征研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(10): 1761-1769.
Zhuang H Y, Wang X J, Wang R, et al. Characteristics of lateral deformation of soil-subway dynamic interaction system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(10): 1761-1769. (in Chinese)
- [12] Zhuang H Y, Wang R, Shi P, et al. Seismic response and damage analysis of underground structures considering the effect of concrete diaphragm wall[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 116: 278-288.
- [13] 李晟. 地铁地下车站结构的抗震与减隔震措施研究[D]. 南京:南京工业大学, 2022.
Li S. Study on anti-seismic measures and isolation measures of fabricated subway underground station structure [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2022. (in Chinese)
- [14] 庄海洋,陈国兴,朱定华. 土体动力粘塑性记忆型嵌套面本构模型及其验证[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(10): 1267-1272.
Zhuang H Y, Chen G X, Zhu D H, et al. Dynamic visco-plastic memorial nested yield surface model of soil and its verification[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(10): 1267-1272. (in Chinese)
- [15] 庄海洋,陈国兴. 对土体动力粘塑性记忆型嵌套面模型的改进[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 118-122.
Zhuang H Y, Chen G X. Improvement of dynamic visco-plastic memorial nested yield surface model of soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 118-122. (in Chinese)
- [16] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.
- [17] 庄海洋,吴滨,陈国兴. 土-大型地铁地下车站结构动力接触效应研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2014, 34(6): 678-686.
Zhuang H Y, Wu B, Chen G X. Study on dynamic contact properties of soil-subway underground structure interaction system[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2014, 34(6): 678-686. (in Chinese)
- [18] Zhuang H Y, Zhao C, Chen S, et al. Seismic performance of underground subway station with sliding between column and longitudinal beam [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 102: 103439.
- [19] 庄海洋,吴祥祖,陈国兴. 考虑初始静应力状态的土-地下结构非线性静、动力耦合作用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(增1): 3112-3119.
Zhuang H Y, Wu X Z, Chen G X. Study of nonlinear static and dynamic coupling interaction of soil-underground structure considering initial static stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(Sup1): 3112-3119. (in Chinese)

- [20] 张亚旭,王修信,庄海洋.土-桩-框架结构非线性相互作用的精细数值模型及其验证[J].防灾减灾工程学报,2010,30(5):558-566.
Zhang Y X, Wang X X, Zhuang H Y. Fine numerical modeling of nonlinear soil-pile-frame structure interaction system and its verification [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(5): 558-566. (in Chinese)
- [21] 楼梦麟,潘旦光,范立础.土层地震反应分析中侧向人工边界的影响[J].同济大学学报:自然科学版,2003,31(7):757-761.
Lou M L, Pan D G, Fan L C. Effect of artificial boundary on seismic response of soil layer [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2003, 31(7): 757-761. (in Chinese)
- [22] 庄海洋,李晟,王伟,等.采用不同隔震形式的双层地铁车站结构地震反应分析[J].振动工程学报,2023,36(2):379-388.
Zhuang H Y, Li S, Wang W, et al. Comparative analysis on seismic performance of two-story subway underground station structures with different isolation systems [J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(2): 379-388. (in Chinese)
- [23] 地下结构抗震设计标准:GB/T 51336—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
(本文编辑:苏泽云)



(上接第 1173 页)

- [15] Lin C H, Hung C, Hsu T Y. Investigations of granular material behaviors using coupled Eulerian-Lagrangian technique: From granular collapse to fluid-structure interaction [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 121: 103485.
- [16] Yu B, Ma Y, Qi X. Experimental study on the influence of clay minerals on the yield stress of debris flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(4): 364-373.
- [17] 王友彪,姚昌荣,刘赛智,等.泥石流对桥墩冲击力的试验研究[J].岩土力学,2019,40(2):616-623.
Wang Y B, Yao C R, Liu S Z, et al. Experimental study of debris flow impact forces on bridge piers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 616-623. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国国土资源部.泥石流灾害防治工程勘查规范:DZ/T 0220—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [19] 李剑伟,杨培果,田文丰.坡面泥石流冲击能量计算的探讨[J].四川建材,2021,47(2):68-69,71.
Li J W, Yang Y G, Tian W F. Discussion on calculation of impact energy of debris flow on slope [J]. Sichuan Building Materials, 2021, 47(2): 68-69, 71. (in Chinese)
- [20] 袁松,郑国强,张生,等.汶川地震后10年公路明(棚)洞病害及处治工程的启示[J].隧道建设(中英文),2019,39(8):1372-1379.
Yuan S, Zheng G Q, Zhang S, et al. Lessons learnt from disease and treatment engineering of open-cut (shed) tunnels in 10-years after Wenchuan earthquake [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(8): 1372-1379. (in Chinese)
- [21] 王希宝,吴鑫珑,袁松.都汶公路麻柳湾泥石流形成机制分析及防护结构设计[J].西南公路,2009,4(1):61-66.
Wang X B, Wu X L, Yuan S. Analysis of formation mechanism and design of protective structures for debris flow at Maliuwan of Duwen Highway [J]. Southwest Highway, 2009, 4(1): 61-66. (in Chinese)
- [22] Ng C W W, Song D, Choi C E, et al. Impact mechanisms of granular and viscous flows on rigid and flexible barriers [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(2): 188-206.