

采用分体柱的地铁地下车站地震反应仿真分析

毛念华^{1,2}

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安;

2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//正高级工程师)

摘要 以某地铁地下车站项目为工程背景, 基于 ABAQUS 有限元软件, 通过对模型建立中出现的数值积分方法、结构材料本构关系、边界条件的确定、地震波的选取与输入等关键问题的分析, 建立合适的三维标准段地铁车站结构计算模型。对 ABAQUS 有限元软件进行动力时程分析中出现的地震波基线漂移现象, 运用 SeismoSignal 软件对地震波进行基线校正。在理论分析的基础上, 通过数值模拟, 分别对采用框架柱和分体柱的地铁车站结构在双向耦合地震作用下进行动力时程分析。通过对采用框架柱和分体柱的地铁车站进行弹塑性时程分析发现, 大震下分体柱的承载力比框架柱减小约 16%, 但是延性提高了约 35%。分体柱可通过损失部分承载力, 改变框架柱的受力特征, 在很大程度上提高了柱子的延性。

关键词 地铁; 地下车站; 分体柱; 地震反应

中图分类号 U231.4; TU311.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.015

Seismic Response Simulation Analysis of Metro Station with Split Column Structure

MAO Nianhua

Abstract Taking an underground station project as the engineering background, ABAQUS finite element software is used to analyze the key issues in the modeling, such as the numerical integration method, the constitutive relation of structural materials, the determination of boundary conditions, the selection and input of seismic waves, finally an appropriate 3D standard metro station calculation model is established. According to the baseline drift of seismic waves occurred in dynamical time-history analysis of ABAQUS, SeismoSignal software is used to correct the baseline. Through theoretical analysis, the dynamical time-history analysis of metro station with split column and frame column structure under bidirectional coupling seismic action is conducted respectively. The results show that under strong earthquake, the load capacity of split column structure is 16% less than that of frame columns, but the ductility of the former increases about 35%. In other words, the split column structure can change the force charac-

teristics of the frame columns by losing some bearing capacity, thus greatly improves the ductility of the column.

Key words metro; underground station; split column; seismic response

Author's address China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

地下建筑结构在地震中的破坏不同于地上建筑, 地铁车站及区间隧道一旦发生毁坏, 不仅会影响城市建筑的生命线工程(地下给排水管道、天然气管道等), 也会给地震后的应急和修复工作带来非常大的困难^[1]。地铁车站结构深埋于土中, 周围岩土介质的存在对其有约束作用, 同时周围岩土介质和结构之间的相互作用使得地下结构地震反应明显不同于地上结构。地下建筑和地上建筑在地震中的反应分析中都会受到结构自振特性和地基土体振动特性的影响, 但是上部建筑的地震响应主要取决于结构自振特征, 包括上部建筑的造型、刚度、质量等; 而对于地下车站结构来说, 周围岩土介质的特性将对建筑结构在地震中的响应产生决定性的影响。此时, 地上建筑的抗震设计方法将不再适用于地下结构, 土体-地下建筑的相互作用将很容易改变场地周围土地的反应特征, 进而也会影响上部已经建立和正在建设的建筑结构的地震响应特征。本文以某地铁地下车站为背景, 基于 ABAQUS 有限元软件, 采用纤维单元建立合适的有限元分析模型, 对分别采用框架柱和分体柱的地铁车站结构进行弹塑性时程分析。

1 土体-地铁车站结构模型概况

某地铁车站为地下车站, 车站总长度(外包长度)为 207.6 m, 标准段宽度为 19.7 m。为了便于有限元软件 ABAQUS 的运算分析, 大大缩减数值模拟计算时间, 建立有限元模型时将该地铁车站主体结

构进行简化处理。由于标准段结构相邻柱子的间距是 9 m,故模型在纵向取 9 m。地铁车站结构计算模型尺寸为 19.70 m×15.53 m×9.00 m。其中,顶板厚 800 mm,中板厚 400 mm,底板厚 900 mm;顶梁、中梁、底梁的截面尺寸分别为 1 200 mm×1 800 mm、1 000 mm×1 000 mm、1 200 mm×1 200 mm;两边侧墙厚 700 mm;框架柱和分体柱的截面尺寸均为 700 mm×1 200 mm。车站结构标准剖面见图 1。车站结构周围土体的主要参数见表 1。

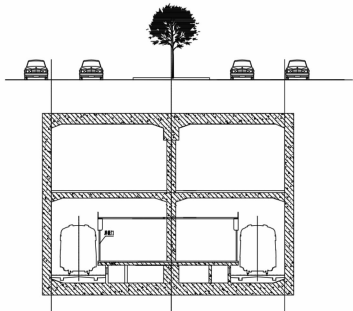


图 1 地铁地下车站结构剖面示意图

表 1 场地土物理力学参数取值

分层	岩土名称	密度/ (g/cm ³)	含水量/ %	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	地基承载力 特征值/ kPa
1	杂填土	1.90		10.0	6.0	70
2	素填土	1.96		13.0	10.0	80
3	粉质黏土	1.91	28.8	46.0	12.0	180
4	风化灰岩	1.65		800.0	55.0	1 800

2 土体-地铁车站结构模型建立

地铁车站梁、柱选择基于材料的纤维杆单元进行建模。纤维杆单元采用 PQ-Fiber^[3] 程序定义。该程序是基于 ABAQUS 有限元软件二次开发的一组单轴材料应力-应变关系模型,在钢筋混凝土结构、钢结构的弹塑性时程分析中应用特别广泛,可以用于定义各种杆系单元的单轴材料本构。

在分析墙板构件时采用分层壳单元。分层壳单元能够把混凝土、钢筋的材料本构关系和剪力墙、楼板等平面建筑的非线性关联起来,在模拟剪力墙、楼板等平面建筑复杂非线性行为上有着很大的优势。壳单元采用 ABAQUS 有限元软件自带的 CDP(混凝土塑性损伤)本构。采用的 CDP 模型需要在属性模块预先定义好 5 个材料参数。本文模型在参数定义时,综合考虑数值模型计算结果的收敛性、合理性和分析效率,建议采用如表 2 所示的参数取值。

地铁车站结构周围土体采用三维实体单元,根据各层土体的地质勘测数据,进行弹塑性时程分析时材料的非线性行为在土体各部位会表现出不同的反应结果。本文数值模型模拟车站结构周围的土体对车站主体建筑的影响时,主要考虑以下两点:①无限远区域的土体本构模型为弹性模型;②近场有限区域土体的本构模型为 Mohr-Coulomb(摩尔-库伦)塑性模型。在使用 Mohr-Coulomb 准则时需要注意:①该准则使用了非关联的流动准则;②该准则中黏聚力的取值一定要大于 0。

表 2 混凝土塑性损伤模型参数取值

参数	取值
膨胀角/(°)	30
偏度	0.1
初始屈服强度比	1.16
不变应力比	0.666 7
黏性系数	0.000 5

研究分析表明,加速度记录中通常有一些长周期分量的存在,尽管它们不会导致加速度时程的漂移,但是却会对积分后的位移时程产生严重的漂移^[4]。本文通过 SeismoSignal 地震波处理软件对所选用的地震波进行处理,选取典型的美国 EL-centro 波的地震数据进行计算。为了节省计算时间,仅选取地震位移时程中具有代表性的加速度峰值前后 20 s 的时程曲线进行分析,时间步长取 0.02 s 进行计算,以基岩波的形式在底部边界输入。

在进行动力时程分析时应根据不同抗震设防烈度的要求对地震记录的峰值进行调幅。具体调幅系数是根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[5]有关不同烈度设防区动力时程分析所采用的加速度峰值的规定。因此分别将地震动调幅调至小震(35 gal(1 gal=1 cm/s²))、大震(220 gal),以考虑在小震、大震情况下采用不同中柱柱体时地铁车站结构的抗震性能。

在对地下结构进行动力分析时,会涉及到无穷远边界的动力分析,必须考虑天然地基是无限延伸的,地基能量将向无穷远处逸散^[6]。

地下车站主体结构与周围土体之间彼此作用的模拟,通过在构件表面上建立接触对,采用 ABAQUS 有限元软件中主从接触面的算法,并且假设在地震波作用下,车站主体结构与周围土体不产生滑离和脱动,即满足位移变形协调条件。建立地

基土-车站结构的三维有限元模型,如图 2 所示。

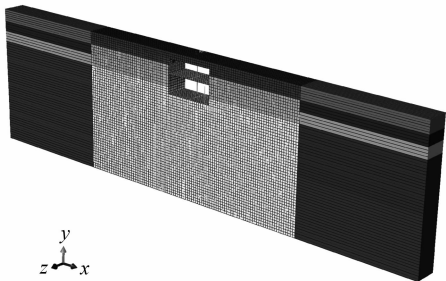


图 2 地基土-车站结构三维有限元模型

3 数值模拟结果分析

对采用框架柱和分体柱的地铁车站进行动力弹塑性时程分析,输入通过“基线校正”调整后得到的地震波位移时程曲线,其中纤维单元框架柱和加芯柱的配筋如图 3 所示。

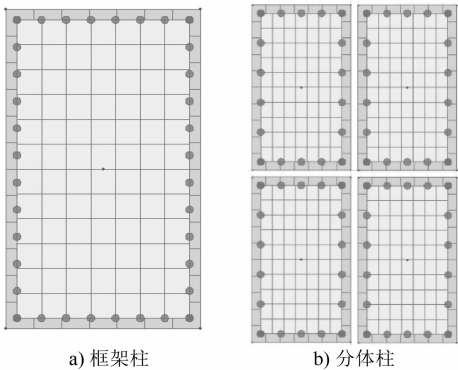


图 3 纤维单元框架柱、分体柱配筋示意图

3.1 车站结构加速度反应结果分析

在考虑水平和竖直双向大震(峰值地面加速度 $A_{PG}=220\text{ gal}$)作用下,分别对采用框架柱、分体柱的地铁车站结构进行分析,得到的地铁车站主体结构各楼层加速度反应值如图 4 所示。

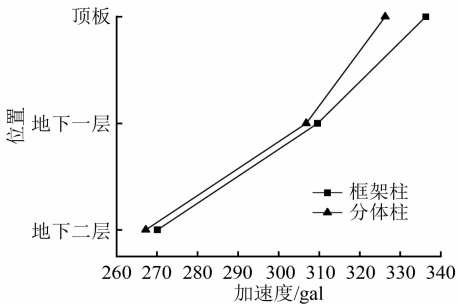


图 4 车站结构沿楼层加速度反应包络图

表 3 给出了采用框架柱、分体柱的地铁车站结构在考虑水平和竖直双向小震($A_{PG}=35\text{ gal}$)、大震

($A_{PG}=220\text{ gal}$)作用下顶板、地下一层、地下二层梁柱节点处的水平方向加速度反应值。

表 3 不同柱子在不同强度地震波作用下的

位置	加速度反应值 m/s^2			
	不同柱子在不同地震波作用下的加速度反应值			
	框架柱		分体柱	
	小震	大震	小震	大震
顶板	86.5	336.3	80.8	326.3
一层楼板	77.8	309.6	74.3	306.8
二层楼板	58.3	270.1	56.7	267.2

通过表 3 可以得出,采用框架柱和分体柱的地铁车站结构表现出各楼层加速度最大值都是从地下二层逐渐往上增加,且在顶板位置处的加速度响应最大。考虑大震作用下,采用框架柱的地铁车站地下一层加速度放大系数为 1.245;采用分体柱的地铁车站地下一层加速度放大系数为 1.220。在地震作用下,地下一层结构位置处遭受到的地震作用更大,受地震作用反应明显。

3.2 车站结构水平位移反应结果分析

在考虑水平和竖直双向大震($A_{PG}=220\text{ gal}$)作用下,分别对采用框架柱、分体柱的地铁车站结构进行分析,得到的各楼层水平位移如图 5 所示。

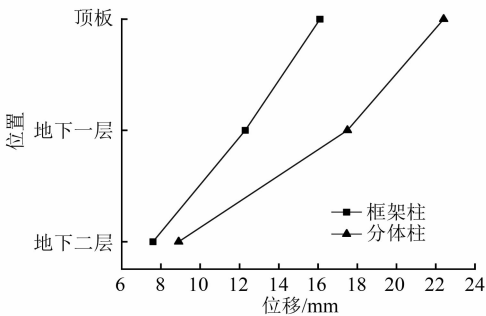


图 5 车站结构沿楼层水平位移反应包络图

表 4、表 5 分别给出了采用框架柱、分体柱的地铁车站结构在考虑水平和竖直双向小震($A_{PG}=35\text{ gal}$)、大震($A_{PG}=220\text{ gal}$)作用下,顶板、地下一层、地下二层梁柱节点处的各层层间位移和层间位移角。

表 4 不同柱子在不同强度地震波作用下的层间位移

位置	不同柱子在不同地震波作用下的层间位移/mm			
	框架柱		分体柱	
	小震	大震	小震	大震
顶板	3.1	16.1	4.6	22.4
一层楼板	2.3	12.3	3.5	17.5
二层楼板	1.2	7.6	1.7	8.9

表 5 不同柱子在不同强度地震波作用下的
层间位移角

位置	不同柱子在不同地震波作用下的层间位移角			
	框架柱		分体柱	
	小震	大震	小震	大震
一层楼板	1/6 375	1/1 342	1/4 636	1/1 041
二层楼板	1/5 727	1/1 340	1/3 500	1/733

从表 4、表 5 中可以看出,地铁车站顶板、地下一层、地下二层各层梁柱节点位置的位移最大值从结构顶板逐步向下减少。在考虑水平和竖直双向地震共同作用下,车站采用框架柱的各楼层在多遇、罕遇地震下的层间位移角最大值分别为 1/5 727、1/1 340;采用分体柱的各楼层在多遇、罕遇地震下的层间位移角最大值分别为 1/3 500、1/733。这主要是因为地下建筑受到周围土体的拘束,地铁车站采用框架柱或是分体柱在各楼层处的层间位移变化均很小。在多遇地震和罕遇地震作用下各楼层的层间位移角最大值均远远低于 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》规定的层间位移角限值 1/550(多遇地震)、1/50(罕遇地震),这表明地下建筑确实拥有较好的抵抗地震作用的能力。大震作用下,采用分体柱时地铁车站结构的最大位移比采用框架柱时的最大位移提高了约 35%,这说明采用分体柱代替框架柱,改变了原来柱子的受力特征,很大程度上提高了柱子的延性。

3.3 车站结构内力反应结果分析

表 6、表 7 分别给出了采用框架柱、分体柱时,在考虑水平和竖直双向小震($A_{PG}=35\text{ gal}$)、大震($A_{PG}=220\text{ gal}$)作用下地铁车站结构的轴力和剪力。

表 6 不同类型的中柱在不同强度地震波
作用下的轴力

位置	不同类型的中柱在不同地震波作用下的轴力			
	框架柱		分体柱	
	小震	大震	小震	大震
顶板	674.81	3 502.28	636.31	3 194.27
一层楼板	779.90	4 131.17	699.38	3 688.17
二层楼板	838.11	4 859.41	755.8	4 249.33

表 7 不同柱子在不同强度地震波作用下柱底的剪力 kN

位置	不同柱子在不同地震波作用下柱底剪力			
	框架柱		分体柱	
	小震	大震	小震	大震
一层楼板	54.93	302.11	48.81	249.13
二层楼板	41.44	241.59	37.25	192.46

从表 7、表 8 中可以看出,各层中结构柱内力大小的变化和每一楼层的层间位移大小的变化有一定的联系,且分体柱所受内力均有所减少;采用分体柱的轴向力和采用框架柱的轴向力相差不到 9%,剪力值相差大约为 16%。地铁车站结构柱是地下建筑中的主要受力部件,在地震反应过程中也是破坏程度最为严重的构件,车站结构各楼层中结构柱在地震中承受了很大的内力,且其受力过程比较复杂,所以在地下建筑抗震设计时,要给予足够的重视。

4 结语

地铁车站采用框架柱和分体柱时,各楼层的最大层间位移角远远小于 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》规定的层间位移角限值。分体柱的空间协同作用改变了框架柱的受力特征,很大程度地提高了柱子的延性。因此在实际工程中,可以采用分体柱来代替传统的框架柱,使地铁车站中心柱的延性更好地适应建筑结构周围土体的变形,以提高地下车站的抗震性能。

分体柱的构造型式、配筋方式及施工程序有别于普通框架柱,其中部钢筋用量及施工作业程序均比普通框架柱有所增加。通过实际工程成本核算,虽采用分体柱钢筋材料用量本身增加 45%左右,但仅占工程总投资的 0.05%左右。作为车站结构体系中的主要受力构件,其性价比及安全抗震能力均有较大的提高,具有较好的推广应用价值。

建立可以永远抵御结构周围土体地震运动和位移变形的地下建筑是不可能的,所以要在承载能力满足设计要求的条件下,使地下建筑有足够的变形能力来吸收消耗能量,使地下建筑的延性适应建筑结构周围土体的变形,而不仅仅是地下建筑能够抵抗周围土体等介质的位移变形,这就需要改变对地下建筑抗震性能传统的认识。通过本文的仿真研究分析,地铁地下车站采用分体柱代替传统的框架柱,不仅有较好的抗震性能,在承载能力满足要求的条件下,延性也得到了很大的提高,因此分体柱可以很好地适应地下建筑结构周围土体介质的位移变形。

参考文献

[1] 李卫超. 基于大客流运用视角谈城市轨道交通地铁车站建筑的优化设计[J]. 建筑工程技术与设计,2014(31): 455.

(限速模式)或 ATP 切除模式运行至点式应答器才能获取到变量信息进入点式 ATP 模式运行。这段以 RM 或 ATP 切除模式运行的距离所需要的时间对于运营可用性计算而言是一个应该加以考虑的因素,这也是传统的 RAM 计算中指标与实际运营相比有较大差别的原因。针对这一问题的关键,是将单核多模典型车载信号系统中的点式 ATP 降级系统替换为连续式 ATP 降级系统,可大大提升运营的可用性指标,并得到了实际工程项目的验证。

3.4 多模车载信号系统的设计约束

运营可用性只是多模车载信号系统设计约束中的一个因素,不同的运营场景会对该系统提出不同的约束条件。多模车载信号系统应根据实际项目的需求来定义约束和边界条件。例如,对于目前方兴未艾的市域线路而言,其目的是为解决铁路网和城市轨道交通网络中力所不能及的问题。市域线路目前已成为铁路网和城市轨道交通网之间的桥梁和纽带,解决了通勤客流去市区上班的问题。这就要求多模车载信号系统至少应能在 CBTC 和 CTCS-2/CTCS-3 制式的系统中混合运行,进而要求多模车载信号系统能实现制式间平滑无扰的切换。在进行这一系统架构设计时,多核多模车载就更贴切要求。在此基础上进行运营可用性指标的反演,确认 CBTC 信息和 CTCS 信息的处理机制的安全,即可开始进行正式的设计工作。

CTCS+CBTC 系统中,多核多模车载信号系统能解决跨区运营所带来的兼容性问题。同时为保证做到平滑无扰切换,A 制式系统在控车过程中,B 制式系统应随时监督是否已接近切换至 B 制式系统的区域,并根据监督结果确定是否要完成 B 制式系统的初始化,同 A 制式系统进行相关的同步和自检,保证 B 制式系统投用后即可运营,保证运营效率。与单核车载信号系统相比,采用多核多模车载信号可进行有效的信息隔离,防止不同空间的变量

被错误地引用,不足之处是信息在不同系统间同步时增加了传输通道的负担,并降低了系统的实时性。

4 结语

随着公众对轨道交通的可用性和灵活性的要求越来越高,以提高可用性和实现不同制式混合运营为目标的多模车载信号系统将成为必然的发展趋势。在统一的对象定义的基础上,通过对不同模式下车载信号系统功能的抽象建模,全面分析各种运营可用性指标受到影响的关键因素,可更加真实地反映车载信号系统的运营可用性指标,防止车载信号系统与运营期望不一致的情况发生。

参考文献

- [1] IEC. International Electrotechnical Vocabulary-Chapter 191: Dependability and quality of service; IEC 60050-191[S]. Geneva: IEC, 1990.
- [2] CTCS-3 级列控系统总体技术规范;Q/CR 661-2018[S]. 北京:中国铁路总公司,2018: 1.
- [3] 汪小勇. 基于通信的列车控制系统轨旁信号显示方案[J]. 城市轨道交通研究,2011(9): 69.
- [4] 穆进超,程剑锋,冯凯. 自主化 CTCS-3 级车载设备双系热备技术研究[J]. 中国铁路,2018(9): 5.
- [5] 汪小勇. 浅谈点式信号系统[J]. 铁道通信信号, 2011(6): 15.
- [6] 汪小勇. 城市轨道交通可靠性研究[J]. 铁道通信信号, 2016(11): 68.
- [7] 卡斯柯信号有限公司. 一种基于车载控制器的闭塞模式自适应控制系统;ZL201610580518. 6[P]. 2018-11-20.
- [8] 卡斯柯信号有限公司. 一种点连式 ATP 系统;ZL201610580675. 5[P]. 2019-02-01.
- [9] 卡斯柯信号有限公司. 一种系统级异构的热备冗余信号系统;ZL201610580703. 5[P]. 2019-01-08.
- [10] 卡斯柯信号有限公司. 双制式融合的轨道交通车载控制系统;ZL201720303249. 9[P]. 2018-02-16.

(收稿日期:2019-04-16)

(上接第 61 页)

- [2] 程多多. 城市地下结构抗震延性分析及地下空间安全管理[D]. 南京:东南大学,2010.
- [3] 曲哲. PQ-Fiber_Manual_v1. 6. [CP]. 北京:清华大学,2012.
- [4] 王巍. 基于 FLAC 的地震分析方法研究及其在地下隧洞中的应用[D]. 南京:河海大学,2008.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质

量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范;GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

- [6] 李丽. 基于 ABAQUS 的高速公路隧道地震动力响应研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.

(收稿日期:2018-12-07)