

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210112001

地铁车站与上盖高层建筑一体化抗震性能研究*

刘翠清

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 随着城市地铁发展,既有运营地铁车站上盖开发工程逐渐增多,新建上盖工程与既有运营地铁车站的相互作用、协同受力及抗震性能等问题受到越来越多的关注。依托我国南方某市地铁运营车站工程,提出了地铁车站与上盖高层建筑一体化抗震思路,分别采用SATWE和MIDAS有限元分析程序建立一体化结构与地基地基土相互作用模型,开展了多遇地震作用下的弹性分析和罕遇地震作用下弹塑性分析。结果表明地震波地震影响系数在结构主周期点上与设计反应谱在统计意义上相符。采用时程分析法针对多遇地震工况进行计算,结果满足规范的结构抗震验算要求,每组地震波计算的地震剪力不小于反应谱法的65%,时程计算的楼层平均地震剪力均小于反应谱法,楼层层间位移角的变化规律和反应谱法基本一致。通过开展罕遇地震动力弹塑性时程分析,发现最大基底剪力与多遇地震基底剪力比为3.29~5.09,结构框架梁柱塑性铰开展趋势合理,最终状态下框架柱基本不屈服,约31.6%的混凝土框梁以及约19%的钢梁达到屈服强度。相关方案达到预期的抗震性能目标。

关键词: 地铁车站; 上盖高层建筑; 钢结构; 抗震性能; 反应谱分析; 时程分析; 数值模拟

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0490-09

Seismic Performance of Integrated Subway Station and Upper Cover with High-Rise Building

LIU Cuiqing

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co.Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: With the development of urban subways, the development of the upper cover structures of existing subway stations in operation has gradually increased. The interaction, cooperative force and seismic performance between the new upper cover project and the operating subway station have attracted more and more attention. Based on the subway operation station project in a certain city in southern China, the integrated seismic thinking of subway stations and upper cover high-rise buildings is proposed. The interaction model between the integrated structure and the foundation soil is established by using SATWE and finite element analysis programs MIDAS respectively and the elastic analysis under frequent earthquake and the elastic-plastic analysis under rare earthquake are carried out. The results show that the seismic influence coefficient of seismic wave was statistically consistent with the design response spectrum at the main period point of the structure. The time history analysis method was used to calculate the frequently encountered earthquake conditions, and the results met the requirements of structural seismic checking calculation. The seismic shear force calculated by each group of seismic

* 收稿日期:2021-01-12;修回日期:2021-04-01

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51879090)资助

作者简介:刘翠清(1971—),女,高级工程师。主要从事结构抗震设计研究。E-mail:390923003@qq.com

waves was not less than 65% of the response spectrum method, and the average floor seismic shear force calculated by time history was less than the response spectrum method. The variation law of displacement angle between floor was basically consistent with the response spectrum method. By analyzing the elastic-plastic time history of rare seismic dynamic, it was found that the ratio of maximum base shear to multiple seismic base shears was 3.29~5.09, the development trend of the plastic hinge of structural frame beam column was reasonable. The frame column did not yield in the final state and about 31.6% of the concrete frame beams and about 19% of the steel beams reached the yield strength. The relevant schemes achieve the expected seismic performance targets.

Keywords: subway station; high-rise buildings; steel structure; seismic performance; response spectrum analysis; time history analysis; numerical simulation

引言

伴随着我国城市轨道交通的不断发展,地铁在城市交通出行中扮演着越来越重要的作用,四通八达的地铁线网将乘客送至城市的各个角落^[1]。作为地铁线网的核心枢纽,地铁车站普遍位于城市繁华地段,车站设计不仅要方便人员出行,还要做到与城市建设完美融合,甚至成为地标性建筑^[2]。基于该设计理念,越来越多的地铁车站选择进行上盖物业开发建设,站城一体化发展,地铁车站既是交通枢纽,又是城市商圈、文化中心等^[3]。

城市地铁结构的抗震性能问题一直都是地震工程研究的热点。1995年日本阪神地震中,大开、长田等地铁车站发生了程度不同的震害,特别是大开地铁车站在地震中几乎完全塌毁,是首次记录到的大型地下结构损毁案例,引起了广大地震工程工作者对地下结构抗震问题的关注和重视。另一方面,随着城市开发的不断深入,地铁上盖物业开发工程具备诸多优点,在工程实际中往往需要利用已建地铁车站的上盖空间进行高层建筑的建设。这将带来结构受力复杂、设计和分析难度增大等问题。比如,如何保证项目施工中地铁运营不受影响,新建项目建成后安全性能否得到保障,若前期未预留上盖条件或预留条件不满足新建工程需求该如何处理等问题均需慎重考虑,需进行必要的理论分析和检验^[4-6]。

本文针对我国南方某市运营中地铁站上盖物业开发工程进行抗震性能分析。该工程前期预留上盖条件不满足新建工程需求,需进行一系列的结构计算以保障工程安全性。本文研究了地铁车站与新建上盖高层建筑一体化抗震性能,以求为类似工程提供一个研究思路和方法。

1 工程概况

1.1 地铁上盖开发工程概况

本文研究工程项目,位于我国南方某市,为既有地铁站上盖高层办公建筑,地铁车站为地下一层,地上两层岛式车站,已投入运营使用。地铁车站设计过程中,预留上盖7层钢筋混凝土结构条件,但因后续使用功能变化,新建上盖建筑调整为10层,为减少对既有建筑的加固改造,降低施工过程中对已投入使用部分的影响,经多轮方案比较,决定上盖部分采用钢结构体系,并采用轻质墙板,减少上部结构质量,尽量在原预留荷载允许范围内完成上部加盖结构。

原结构地下一层、地上两层均为钢筋混凝土框架结构,新建第三层为钢筋混凝土框架过渡层,框架柱为钢筋混凝土柱,框架梁采用普通钢筋混凝土梁,新建4~12层均为钢结构,楼板采用闭口压型钢板组合楼盖,钢柱插入第三层混凝土柱底,利用过渡层实现混凝土结构与钢结构之间的转换过渡。本工程结构竖向布置如图1所示。结构总建筑面积68 765.65 m²,其中上盖建筑面积50 931.66 m²。

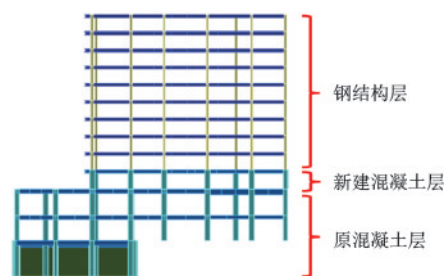


图1 地铁上盖工程结构竖向布置

Fig.1 Vertical layout of the subway upper cover engineering structure

1.2 场地自然条件及地基地震效应

本工程所处场地属于阶地地貌单元,局部发育有坳沟,岩土层自上而下分布有杂填土、素填土、粉质黏土、凝灰岩和闪长花岗岩等,地下水类型主要为孔隙潜水、基岩裂隙水。图2为该工程的地质剖面图,具体工程场地的主要岩土层分布情况及土层参数见表1。综合分析场地稳定性和地基稳定性好,适合工程建设。

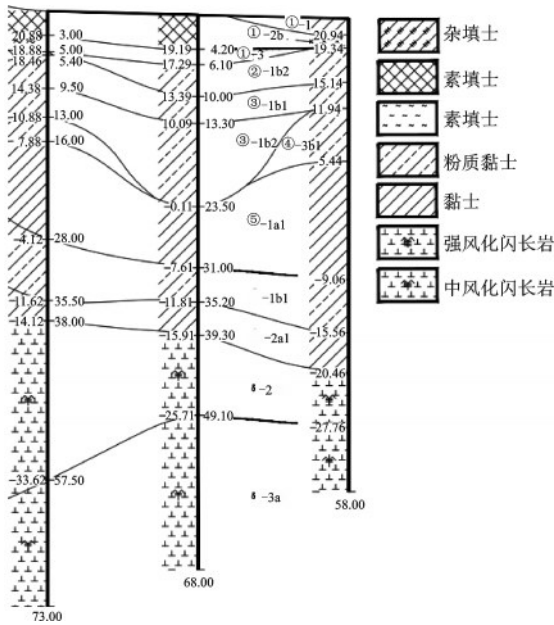


图2 工程场地岩土层分布断面

Fig.2 Distribution section diagram of geotechnical layers in the engineering site

表1 工程场地岩土层分布特征

Table 1 Distribution characteristics of soil in the engineering site

层号	岩土层名称	状态	承载力特征值/kPa	压缩模量/MPa
1-1	杂填土	松散	—	—
1-2	素填土	软-可塑	—	—
1-3	素填土	可塑	—	—
2-1	粉质黏土	可塑	140	11.5
2-2	粉质黏土	可塑	240	16.5
3-1	粉质黏土	可塑	260	19.5
3-2	粉质黏土	硬塑	250	15
4	含卵砾石粉质黏土	可-硬塑	300	21
5-1	强风化凝灰岩	呈密实砂土状及碎块状	280	16
5-2	强风化闪长花岗岩	呈密实砂土状及碎块状	350	—
5-2A	中风化闪长花岗岩	岩芯较破碎	1 400	—

该市位于长江中下游—南黄海地震带,属中强震活动区,根据抗震规范^[7-8],抗震设防烈度为VII度,设计基本地震加速度值为0.1g,设计地震分组为第一组。上盖建筑抗震设防类别为乙类,场地类别为III类,设计特征周期值按插值法取0.52 s。

1.3 计算软件和模型

本工程采用由中国建筑科学研究院编制的SATWE进行整体分析,并采用MIDAS BUILDING对SATWE模型计算得到多遇地震作用下的内力和变形进行校核,验证力学模型正确可靠,结构主要分析参数见表2。

表2 结构主要分析参数

Table 2 Main analysis parameters of structure

计算参数	模型取值
结构模型	地上层数 (结构主屋面) 地上层数 地下层数
混凝土容重/(kN·m ⁻³)	26
钢材容重/(kN·m ⁻³)	78
嵌固位置	地下室顶板
结构类型	钢筋混凝土框架 (1—3层),钢框架 (4层以上)
恒活载分开信息	恒活分开
竖向荷载计算信息	施工模拟三*
抗震设防类别	重点设防
设防烈度	7度计算,8度抗震措施
场地土类别	III类
特征周期	0.52 s
设计地震分组	第一组
多遇地震影响系数最大值	0.08
结构阻尼比	混凝土0.05,钢结构0.04
中梁刚度放大系数	按2010规范取值
周期折减系数	0.80
地震力振型组合数	36
振型组合方法	考虑扭转耦联
地震力计算	单向偶然偏心计算
混凝土框架抗震等级	一级
钢框架抗震等级	三级
是否考虑P-Δ	根据结构整体稳定分析结果:是
楼层刚度算法	地震剪力与层间位移比算法
风荷载	按规范取值
地面粗糙度类别	B类

*注:为使计算结果更符合工程实际,竖向荷载加载采用施工模拟三,即分层计算各层刚度后,再分层施加竖向荷载

SATWE主要用于结构建模计算、结构设计、结构性能化设计等;MIDAS BUILDING 主要用于设计指标复核、弹塑性时程分析等,建立的模型如图3和图4所示。

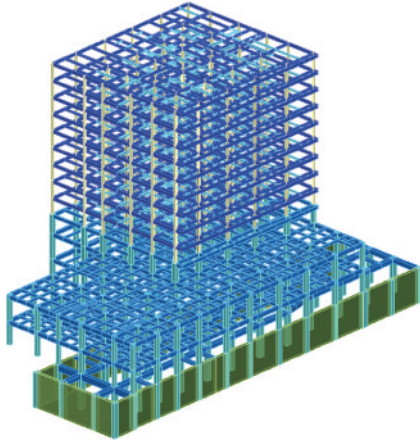


图3 地铁上盖工程SATWE计算模型

Fig.3 SATWE calculation model of the subway upper cover structures

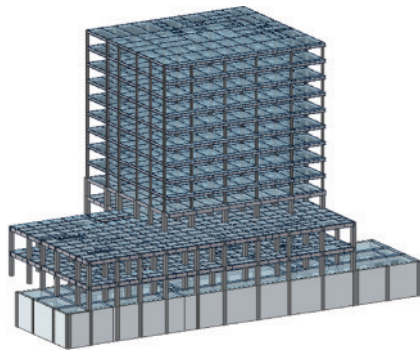


图4 地铁上盖工程MIDAS计算模型

Fig.4 MIDAS calculation model of the subway upper cover structures

2 多遇地震下结构弹性分析

2.1 反应谱计算结果

两款软件的重力荷载代表值及楼层质量分布见表3。

由表3可见两种软件结构总质量基本一致,楼层质量比基本满足规范要求。两款软件的前六阶振动模态见表4。

两款软件的分析结果表明,其计算的模态基本一致,前三阶振型分别为Y向平动、X向整体平动及扭转;结构的第一扭转周期与第一平动周期之比小于0.85,满足规范要求。两款软件计算的竖向振动

表3 地铁上盖工程楼层质量分布

Table 3 Floor quality distribution of the subway upper cover structure

层号	层高/标高	楼层质量 (恒+活)/kN		质量比	
		SATWE	MIDAS	SATWE	MIDAS
13	3.75/45.40	1 919.5	1 938.6	1.5	1.5
12	3.75/41.65	1 274.2	1 284.4	1.0	1.0
11	3.75/37.90	1 274.2	1 284.4	1.0	1.0
10	3.75/34.15	1 274.2	1 284.4	1.0	1.0
9	3.75/30.40	1 334.7	1 344.2	1.0	1.0
8	3.75/26.65	1 285.7	1 295.9	1.0	1.0
7	3.75/22.90	1 285.7	1 295.9	1.0	1.0
6	3.75/19.15	1 334.7	1 344.2	1.0	1.0
5	4.2/15.4	1 285.7	1 295.9	0.7	0.7
4	5.7/11.2	1 853.6	1 860.2	0.3	0.3
3	5.5/5.5	6 927.3	6 861.3	0.8	0.8
2	3.75/49.15	8 406.1	8 331.2	1.0	1.0
合计		29 455.6	29 420.5	—	

表4 地铁上盖工程结构前六阶平动周期

Table 4 First six vibration periods of the subway upper cover structure

振型	SATWE			MIDAS BUILDING		
	秒	振动方向	振型成分 X+Y+T	秒	振动方向	振型成分 X+Y+T
1	2.56	X	0.95+0.05+0.00	2.56	Y	0.82+ 0.02+0.16
2	2.51	Y	0.04+0.91+0.05	2.52	X	0.02+ 0.84+0.14
3	2.14	T	0.00+0.05+0.95	2.16	T	0.01+ 0.12+0.87
4	0.87	X	0.61+0.35+0.04	0.87	X	0.44+ 0.32+0.24
5	0.85	Y	0.39+0.57+0.04	0.85	Y	0.39+ 0.60+0.01
6	0.73	T	0.00+0.07+0.92	0.73	T	0.17+ 0.03+0.80
质量参与系数	X		99.93%	X		100.00%
	Y		99.98%	Y		100.00%
Tt/T1	0.835			0.845		

频率基本一致,竖向质量参与系数均大于90%。由此可初步判定模型的分析结果准确、可信。

结构在多遇地震作用下的楼层层间位移角如图5所示。由图5可见,上盖工程钢结构部分最大层间位移角小于1/250,混凝土部分最大层间位移角小于1/550,均满足规范要求,两种软件层间位移角计算结果基本一致。结构底部两层楼层层间位移角较小,但相应的层间位移比较大,底部两层(原结构)的层间位移比均大于1.2,最大值为1.49大于1.4,结构水平不规则。

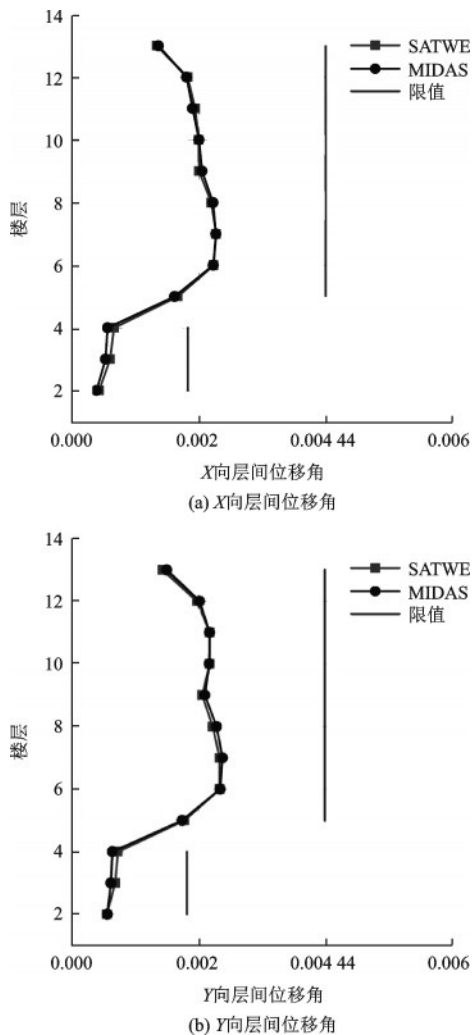


图5 地铁上盖工程层间位移角对比

Fig.5 Comparison of inter-story displacement angles of the subway upper cover structure

此外,结构的剪重比、抗剪承载力比、侧向刚度比等均满足规范要求,两个主方向刚重比最小值均大于5.0,能够通过整体稳定验算的要求^[9]。

2.2 多遇地震作用下弹性时程分析

弹性时程分析,本文采用的场地时程波满足以下条件:每条时程曲线计算所得的结构底部剪力不应小于振型分解反应谱法求得的底部剪力的65%,多条时程曲线计算所得的结构底部剪力的平均值不应小于振型分解反应谱法求得的底部剪力的80%^[10-11]。

按建筑场地类别、设计地震分组及结构动力特性,选用5组实际强震记录和2组人工模拟的加速度时程曲线^[12-14]。选择的5组天然波分别为:2010年CHIHUAHUA地震波、1979年DELTA地震波、2007年NIGH11地震波、1987年EL CENTRO IMP地震波和2010年SPFS地震波;2组人工波根据设计反应谱拟合而成。计算7组地震波的主向反应谱曲线,与设计反应谱进行对比,计算结果如图6所示。对比图中曲线可以看出,所选时程曲线的地震影响系数在结构主周期点上与设计反应谱在统计意义上相符。

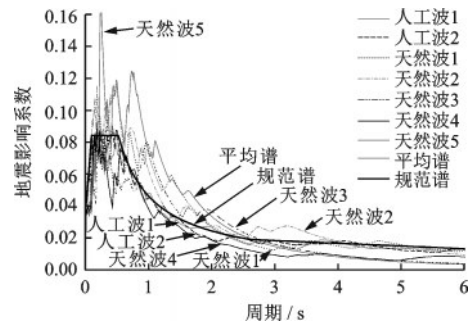


图6 所选地震波加速度谱与规范谱对比

Fig.6 Comparison between acceleration spectrum of the selected seismic wave and standard spectrum

时程分析计算所得最大层间位移角结果如图7所示,可以看出和反应谱计算结果基本一致,满足规范要求。

2.3 弹性分析主要结论

本工程采用SATWE软件计算结构主要设计指标,并采用MIDAS BUILDING软件复核,主要结论如下:

(1)两种软件计算的结构质量、周期、楼层剪力基本一致,计算模型准确可靠;统计的位移比、刚度比和承载力比等主要计算结果基本一致。

(2)采用SATWE补充分析了多遇地震作用下

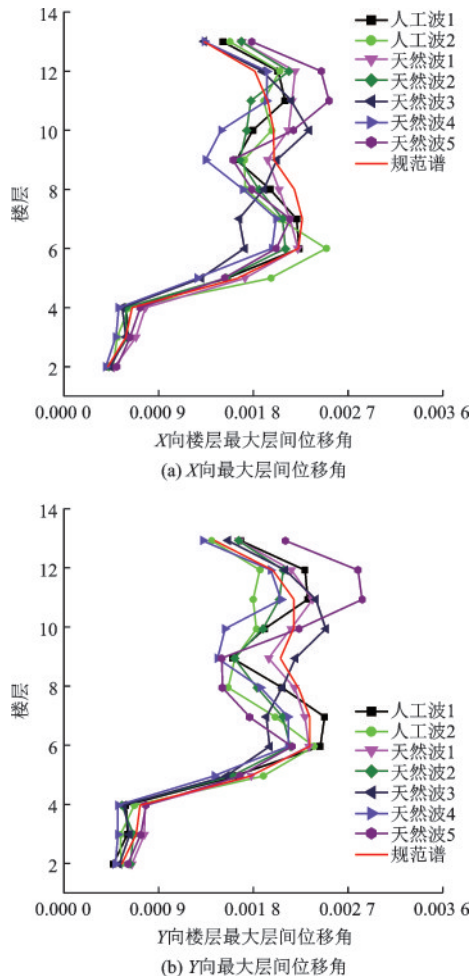


图7 时程分析所得结构最大层间位移角

Fig.7 Maximum inter-story displacement angles obtained from time history analysis

时程分析,计算结果表明每组地震波计算的地震剪力不小于反应谱法的65%,地震波计算的地震剪力平均值不小于反应谱法的80%,地震波地震影响系数在结构主周期点上与设计反应谱在统计意义上相符。

(3)时程计算的楼层平均地震剪力均小于反应谱法,结构采用反应谱法计算地震剪力时无需放大。时程计算的楼层层间位移角的变化规律和反应谱法基本一致,结果离散性小。

3 罕遇地震下结构弹塑性时程分析

3.1 主要技术参数指标

本工程混凝土本构关系采用的单轴受压应力-应变本构模型^[15];钢材采用双折线本构模型,屈服前后的刚度不同,屈服后的刚度使用折减后的刚度。

无论屈服与否,卸载和重新加载时使用弹性刚度。为了准确描述地铁车站及上部建筑物的钢筋应力-应变行为,钢筋混凝土和型钢混凝土构件采用了修正武田三折线模型(图8),并且考虑了刚度退化。模型中第一折线拐点用于模拟开裂强度,第二折线拐点用于模拟屈服强度。钢结构构件则采用了标准双折线滞回模型(图9),卸载刚度使用弹性刚度。

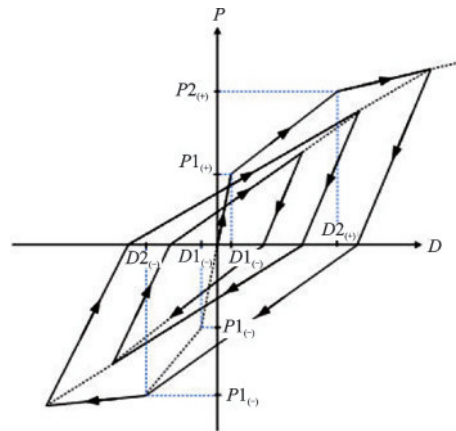


图8 修正武田三折线滞回模型

Fig.8 Modified Takeda trilinear hysteretic model

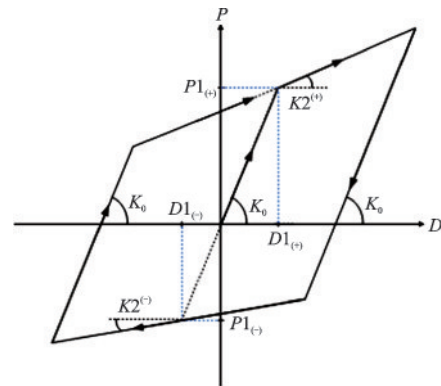


图9 标准双折线滞回模型

Fig.9 Standard bilinear hysteretic model

为了准确描述结构体系中的梁柱相互作用,采用了具有非线性铰特性的梁柱单元。梁单元公式使用了柔度法,在荷载作用下的变形和位移使用了小变形和平截面假定理论,并假设扭矩和轴力、弯矩成分互相独立无关联。非线性梁柱单元可考虑 $P-\Delta$ 效应,在分析的每个步骤都会考虑内力对几何刚度的影响重新更新几何刚度矩阵,并将几何刚度矩阵加到结构刚度矩阵中。采用了弯矩-转角梁柱单元,即在单元两端设置了长度为0的平动和旋转非线性弹簧,而单元内部为弹性的非线性单元类型(图10)^[16]。

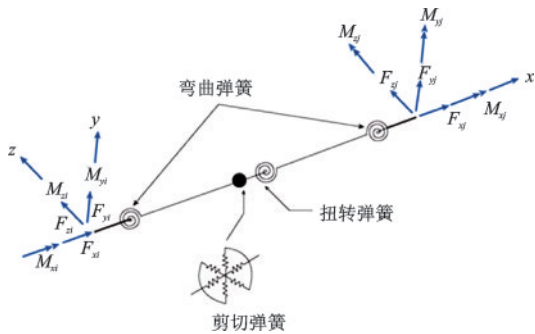


图10 弯矩-旋转角单元的铰位置示意

Fig.10 Hinge position of moment rotation angle element

本工程非线性方程计算采用Newmark- β 直接积分方法^[17],迭代参数中设定最小时间步长为 $1E-5$ s,最大迭代次数为30次,不考虑 $P-\Delta$ 效应的影响,非线性分析时自动更新阻尼矩阵。结构初始荷载工况以弹性分析D+0.5L工况为基准,阻尼比取0.05。

罕遇地震作用分析时,采用双向地震输入,地震波峰值为 220 cm/s^2 ,地震波强度比主次向按1:0.85确定。

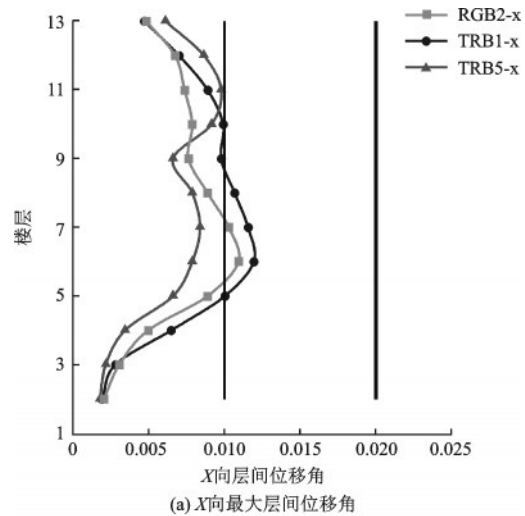
3.2 动力弹塑性计算结果及分析

抗震性能评估将通过对结构整体抗震性能和构件变形水平两个方面来考察。整体性能的评估将从结构弹塑性层间位移角、塑性发展过程及塑性发展的区域来评估。构件的评估从构件塑性变形与塑性变形限制值的大小关系、关键部位、关键构件塑性变形情况来评估^[18]。

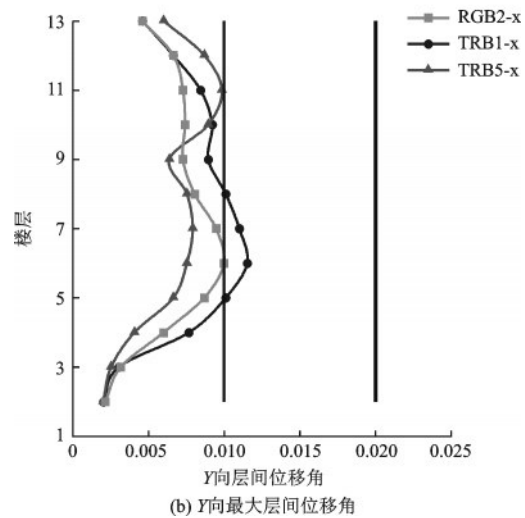
罕遇地震动力弹塑性时程分析选择了1组人工波RGB2和2组天然波TRB1(2010年CHIHUA-HUA地震波)、TRB5(2010年SPFS地震波)。楼层X向和Y向层间位移角如图11所示,结果表明结构最大层间位移角均小于1/50,满足性能化设计要求。

罕遇地震作用下楼层剪力如图12所示。罕遇地震作用下结构基底剪力与多遇地震作用下的比值约为3.29~5.09,表明结构整体延性较好,能够有效耗散地震能量。

通过对各组波输入下结构变形和塑性损伤的对比,人工波RGB2的Y向地震剪力较大,破坏程度相对严重,约有20%的构件进入第二屈服。从框架梁柱的塑性铰开展趋势看,少量框架柱(1.4%)达到屈服强度,约31.6%的混凝土框架梁以及约19%的



(a) X向最大层间位移角



(b) Y向最大层间位移角

图11 罕遇地震作用下结构最大层间位移角

Fig.11 Maximum inter-story drift angle of the structure under rare earthquake

钢梁达到屈服强度,框架梁柱的塑性铰开展趋势合理,基本满足性能化设计要求。

3.3 罕遇地震动力响应规律

整体来看,结构在罕遇地震作用下的弹塑性反应及破坏机制,符合结构抗震工程的概念设计要求,能达到预期的抗震性能目标。结构罕遇地震分析可得如下规律:

(1)罕遇地震计算楼层最大位移角X向为1/84,Y向为1/87,均小于1/50,满足结构性能要求。

(2)罕遇地震计算楼层最大基底剪力与多遇地震基底剪力比为3.29~5.09。

(3)结构罕遇地震作用下框架梁柱塑性铰开展趋势合理,最终状态下,框架柱基本不屈服,约

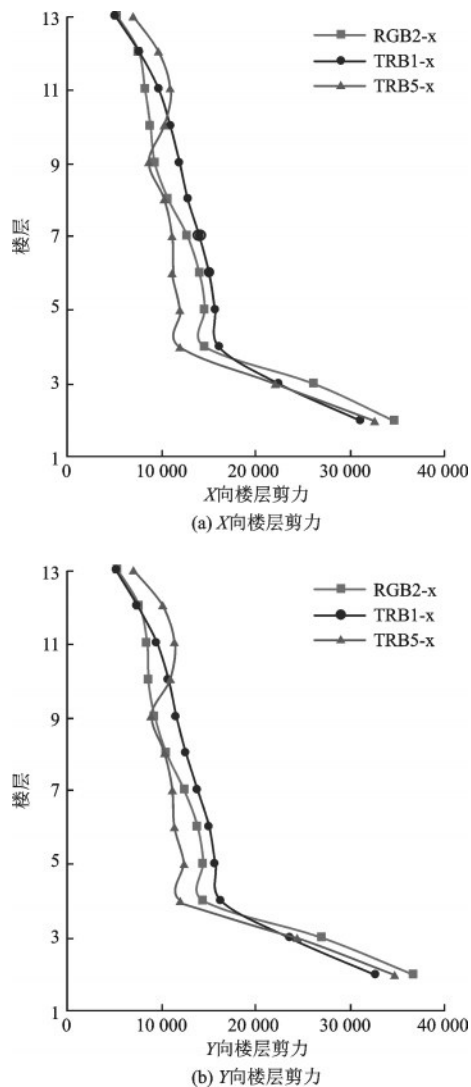


图 12 罕遇地震作用下楼层剪力图

Fig.12 Floor shear diagram under rare earthquake

31.6%的混凝土框梁以及约19%的钢梁达到屈服强度,基本满足性能化设计要求。

4 结 论

(1)提出了地铁车站与上盖高层建筑一体化抗震思路,采用SATWE软件和MIDAS软件建立一体化结构与地基地土相互作用模型,对多遇地震作用下的内力和变形计算结果进行分析比较,结果表明各动力特性指标满足规范要求。

(2)采用时程分析法针对多遇地震工况进行计算,发现时程计算的楼层平均地震剪力均小于反应谱法,结构采用反应谱法计算地震剪力时无需放大。楼层地震剪力取时程计算所得与振型分解反应谱法计算结果的包络值进行结构设计,可以保证

各构件满足多遇地震弹性要求。

(3)开展了罕遇地震动力弹塑性时程分析,结果表明罕遇地震计算楼层最大基底剪力与多遇地震基底剪力比为3.29~5.09;结构罕遇地震作用下框架梁柱塑性铰发展趋势合理,框架柱基本不屈服,约31.6%的混凝土框梁以及约19%的钢梁达到屈服强度,基本满足性能化设计要求。

参考文献:

- [1] 谢伟平,赵娜,何卫,等.地铁上盖物业振动舒适度分析[J].土木工程学报,2013,46(6):90-96.
Xie W P, Zhao N, He W, et al. Analysis on vibration serviceability of over-track buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 90-96. (in Chinese)
- [2] 辛兰.深圳市地铁上盖物业一体化开发模式研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
Xin L. Study on the integrated development model of property above the metro in Shenzhen [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [3] 程全杰.某地铁上盖超限结构基于抗震性能化设计[D].邯郸:河北工程大学,2017.
Cheng Q J. A subway superstructure based on seismic performance-based design[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2017. (in Chinese)
- [4] 王田友,丁洁民,楼梦麟,等.地铁运行所致建筑物振动的传播规律分析[J].土木工程学报,2009,42(5):33-39.
Wang T Y, Ding J M, Lou M L, et al. Subway-induced building vibration and its propagation[J]. China Civil Engineering Journal, 2009,42(5): 33-39. (in Chinese)
- [5] 梁兴文,黄雅捷,杨其伟.钢筋混凝土框架结构基于位移的抗震设计方法研究[J].土木工程学报,2005,38(9):53-60.
Liang X W, Huang Y J, Yang Q W. Displacement-based seismic design method of RC frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2005,38(9): 53-60. (in Chinese)
- [6] AjrabJack J, PekcanGokhan, ManderJohn B. Rocking wall - frame structures with supplemental tendon systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(6).
- [7] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [8] 中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S].北京:

- 中国建筑工业出版社,2015.
- [9] 高层民用建筑钢结构技术规程:JG J99—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [10] Zhang J, Zhang B, Liu Y H, et al. Experimental Study and numerical analysis of sihui metro depot and the superstructure [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 226-228: 176-180.
- [11] Zhang J, Zhang B, Li X H. Numerical simulation and parameter analysis of building vibration caused by ground line of rail transit [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 353-356: 3658-3663.
- [12] 王亚勇. 结构抗震设计时程分析法中地震波的选择 [J]. 工程抗震与加固改造, 1988(4): 15-22.
Wang Y Y. Selection of seismic wave in time history analysis method of structural seismic design [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 1988 (4): 15-22. (in Chinese)
- [13] 杨溥, 李英民, 赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标 [J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 33-37.
Yang P, Li Y M, Lai M. A new method for selecting inputting waves for time-history analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33 (6): 33-37. (in Chinese)
- [14] Mitsumasa M, Tatsuya A, Tadashi I, et al. Shaking table tests on seismic response of steel braced frames with column uplift [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(14): 1767-1785.
- [15] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [16] 朱春明,程小燕,陈岩,等. 地铁上盖带转换层框架结构动力弹塑性时程分析 [J]. 建筑结构, 2014, 44(5): 66-70.
Zhu C M, Cheng X Y, Chen Y, et al. Dynamic elastic-plastic time-history analysis on frame structure with transfer storey above the subway [J]. Building Structure, 2014, 44(5): 66-70. (in Chinese)
- [17] 魏琰,朱锦心,蒋自立. 多层建筑扭转弹塑性地震反应分析 [J]. 土木工程学报, 1980(1): 52-65.
Wei L, Zhu J X, Jiang Z L. Elasto-plastic earthquake response analysis for multi-storeyed buildings taking account of torsion [J]. China Civil Engineering Journal, 1980(1): 52-65. (in Chinese)
- [18] 汪梦甫,周锡元. 高层建筑结构抗震弹塑性分析方法及抗震性能评估的研究 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 44-49.
Wang M P, Zhou X Y. Modified pushover analysis and seismic performance evaluation for tall building [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36 (11): 44-49. (in Chinese)

(本文责编:苏泽云)



(上接第 489 页)

- [15] 吕红山,赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数 [J]. 地震学报, 2007(1): 67-76, 114.
Lyu H S, Zhao F X. Site coefficients suitable to China site category [J]. Acta Seismologica Sinica, 2007(1): 67-76, 114. (in Chinese)
- [16] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [17] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and nonstationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society, 1998, 454 (1971): 903-995.
- [18] 吴琛,周瑞忠. Hilbert-Huang 变换在提取地震信号动力特性中的应用 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 41-46.
Wu C, Zhou R Z. Application of Hilbert-Huang transform in extracting dynamic properties of seismic signals [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(5): 41-46. (in Chinese)
- [19] 王博,杨柯,刘伯权,等. 长周期地震动脉冲特性对 RC 框架结构响应的研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2019, 51(4): 538-544.
Wang B, Yang K, Liu B Q, et al. Study on the influences of pulse characteristics for long-period ground motions on the response of RC frame structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 538-544. (in Chinese)