

装配式地铁车站地震响应数值分析

秦祎文¹, 杨桃^{1,2}, 郭昊天¹, 原朝玮¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 四川都金山地轨道交通有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要:为探究装配式地铁车站不同方向地震波作用下的地震响应,以长春某装配式地铁车站为背景,采用动力有限元分别对比分析了装配式和现浇式2种地铁车站的水平、竖向以及水平-竖向耦合人工地震波作用下的地震响应。结果表明:装配式车站较现浇式车站具有更强的竖向抗震性能,但其水平向抗震性能相对较弱;不同方向的波在叠加时会产生一定的“抵消”作用,装配式车站在“抵消”作用下表现得更为稳定;装配式地铁车站整体满足相关抗震安全性要求。

关键词:地铁车站;装配式结构;地震响应;数值分析

中图分类号: U231 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)04-0080-08

相较于现浇式地铁车站现场施工存在诸多问题,装配式地铁车站具备“加快施工进度,缩短工期,易于把控施工质量,减小对路面交通影响”的优势,为解决现有地铁设计施工中存在的问题提供了有效方法,成为未来地铁车站结构发展的重要趋势^[1-3]。神户地震中大开地铁车站遭受了极大的损害,说明了人们长期以来对地下工程具有很好的抗震性能的认识是有偏差的,地下结构在抗震性能方面仍然存在着某些不明确的弱点^[4-6]。因此,在修建地下建筑时,对结构进行抗震性能的分析是必不可少的。目前国内外主要采用现浇式结构修建地铁车站,相应的抗震研究多集中于断面形式简单的现浇式地铁车站^[7-9]。由于装配式结构在地铁车站中应用的较少,现阶段关于装配式地铁车站的研究多集中于其施工工艺和施工方法,目前对于装配式地铁车站在地震作用下的地震响应及反应机理的研究还处于起步阶段,部分相关领域的研究甚至还处于空白阶段^[10-13]。基于此,以长春地铁2号线某装配式地铁车站为背景,采用Midas-GTS-NX构建动力数值模型,对比分析了不同人工地震波作用下装配式和现浇式2种地铁车站的地震响应,探讨了在不同方向地震波同时作用下对车站结构产生的叠加效应,重点剖析了装配式结构的整体抗震性能是否满足实际工程的要求,以期能为装配式地下结构抗震研究提供一定的参考。

1 工程概况

该地铁车站地处长春严寒气候区域,每年地铁施工有4~5个月的冬歇期,致使工程工期带来的压力巨大。因此,为了加快施工速度,缓解施工工期的压力,该工程开创性地采用了装配式结构(如图1所示),大大加快了施工进度^[14-15]。

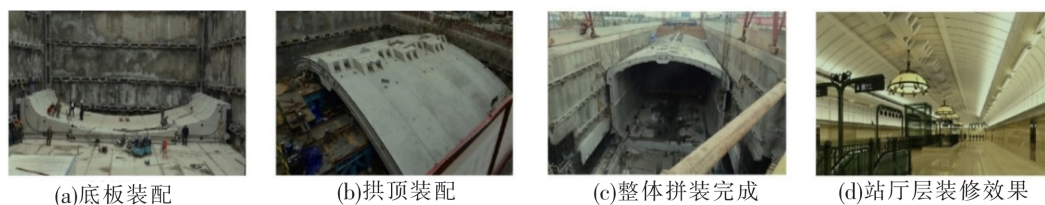


图1 装配式地铁车站修建流程^[16]

收稿日期:2019-05-16 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20190093

基金项目:国家重点研发计划资助(2017YFC0805306)

作者简介:秦祎文(1995—),男,硕士研究生,研究方向为隧道及地下工程。E-mail:458095710@qq.com

秦祎文,杨桃,郭昊天,等.装配式地铁车站地震响应数值分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(4):80-87.

该车站为换乘车站,车站为地下 2 层,车站采用桩锚体系基坑支护结构的明挖车站,车站主体为单拱双层马蹄形结构,结构总宽 20.50 m、总高 17.45 m,外围主体承载结构由环宽 2 m 的 7 块预制承载片组成,预制承载片的编号分别为 A~E,共计 94 环^[16](见图 2)。结构整体无现浇混凝土湿作业,为“全装配式结构”。预制装配结构环向的构件与构件之间、纵向的环与环之间均采用“榫槽注浆式接头”形式,接头部位的接缝注浆材料采用环氧树脂浆液。

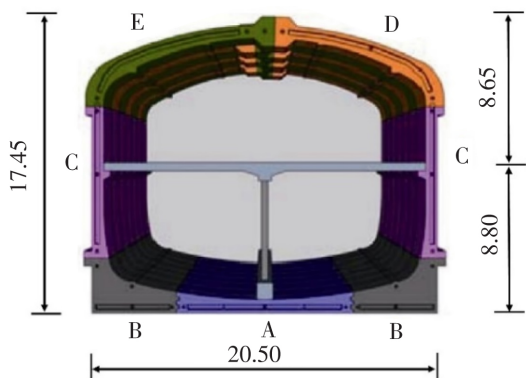


图 2 装配式地铁车站断面^[16](单位:m)

2 数值计算方案

2.1 计算模型及参数

采用 Midas-GTS-NX 构建动力数值模型,土体服从摩尔-库伦准则,模型接触部分使用混凝土-环氧树脂接触单元模拟。建模假定如下:平截面假定(结构断面在地震波作用变形前后均为平截面);榫槽注浆式接头为均质各向同性材料。为了消除反射波带来的影响,文中对模型的侧边和底面均施加了粘弹性人工边界,并对模型底面施加了固定的底部约束(模型如图 3 所示)。根据《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)的规定,模型侧人工边界与地下结构的距离不应小于地下结构有效宽度的 3 倍,因此,本二维模型尺寸设置为长(横向)×宽(纵向)=143.5 m×85.52 m。试件结构采用 C50 混凝土,计算中采用弹性模型,弹性模量 34.50×10^6 kN/m²,泊松比 0.20,容重 25 kN/m³。对于混凝土-环氧树脂接触面,法向刚度模量为 3.60×10^6 kN/m³,剪切刚度模量为 1.30×10^6 kN/m³,内聚力为 2 000 kN/m²,内摩擦角为 50°,抗拉强度为 2 650 kN/m²。

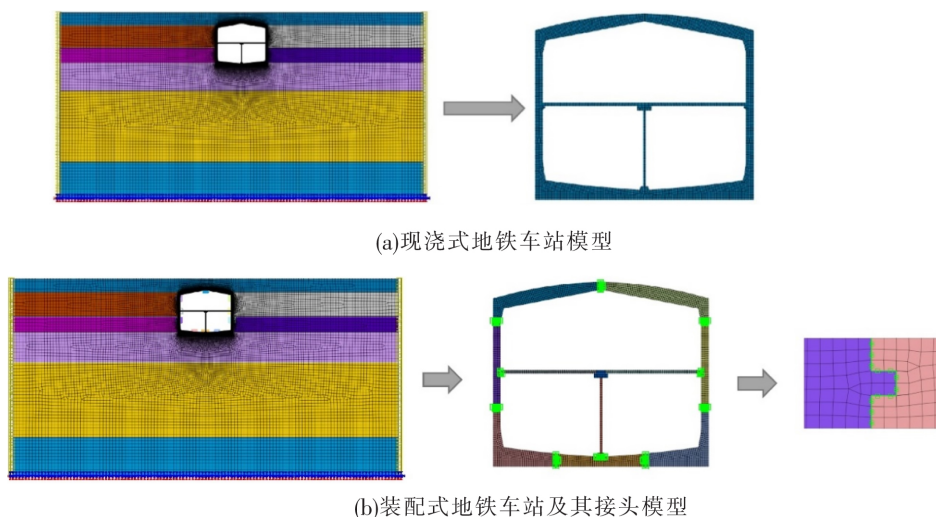


图 3 2 种地铁车站数值模型

2.2 地震输入

按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)规定,该地铁车站地处抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为 $0.10g$,设计地震分组为第一组的区域。模型中输入的不同人工地震波持续的时间均为 53.72 s,其中水平波的峰值加速度 $0.10g$,加速度峰值时刻为 2.14 s。见图 4。目前,因为对竖向地震动的设防烈度没有形成统一的规范,根据经验:竖向运动的加速度峰值通常可达到水平向运动加速度峰值的 30%~60%,因此,按照安全的原则取竖向加速度峰值为 $0.06g$,利用线性时程(直接积分法)计算模型。地震动下,土体与结构一起运动,不考虑土体出现滑动、分离的现象,也不考虑地下水的影响。土层物理力学参数见表 1。

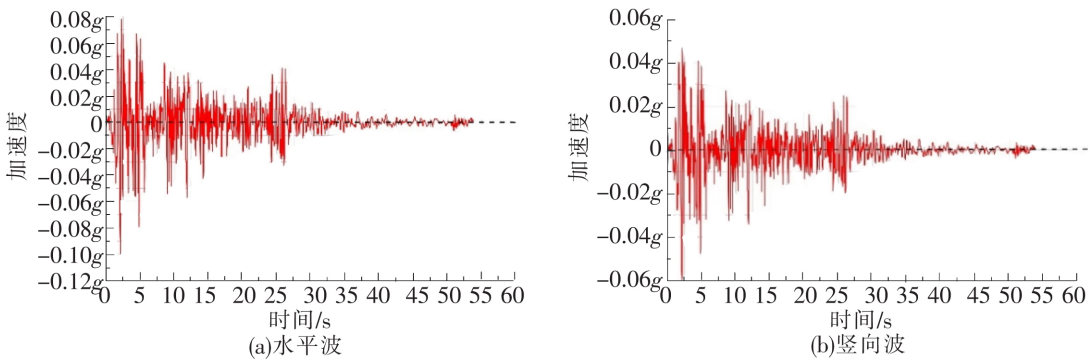


图 4 人工地震波的加速度时程曲线

表 1 土层物理力学参数

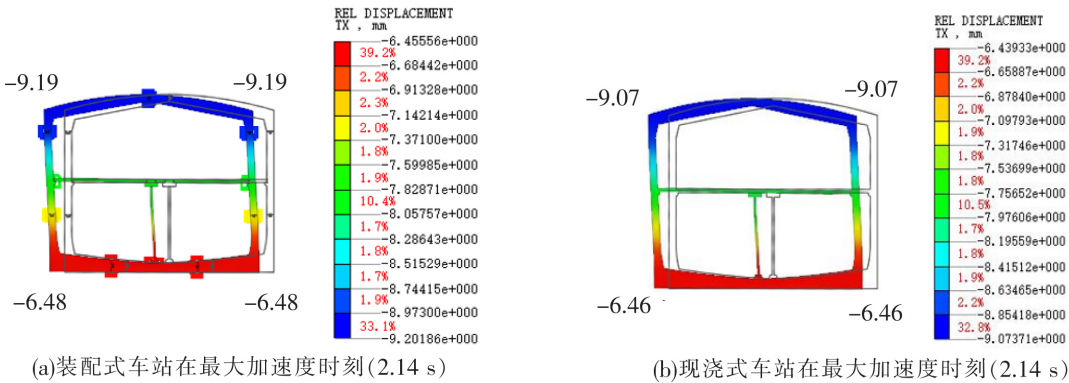
地层代号	土层厚度 h/m	岩性名称	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	动弹性模量 E_d/MPa	动剪切模量 G_d/MPa	动泊松比 μ_d
1	5	杂填土	1 590	10	8	92	37	0.35
2	9	粉土	1 990	14	30	171	63	0.37
3	6	黏土	2 000	20	30	213	79	0.35
4	11	细中砂	2 020	30	34	653	244	0.34
5	28	粉质黏土	2 020	36	18	472	178	0.34
6	14	细中砂	2 565	31	33	837	314	0.33

3 2 种地铁车站地震响应对比分析

3.1 水平向地震波作用

3.1.1 车站结构在水平向的地震响应

大量地震实例证明:在地震波的作用下,土层发生水平方向的相对错动是导致地下建筑结构在水平向产生较大的相对位移,进而发生破坏的重要原因^[17-18]。数值模拟结果表明,在水平向的人工地震波作用下,2 种车站的侧墙在水平方向均产生较大的相对变形,且装配式车站的相对变形大于现浇式车站(如图 5 所示)。2 种地铁车站的地震反应完全相同:从人工地震波记录加速度峰值时刻(2.14 s)开始,车站侧墙相对位移逐渐增大,到 7.88 s 时达到最大相对位移,最后到结束时刻(53.72 s)。在整个水平向人工地震波作用的过程中,相对变形既有增大也有减小,处于“变形动态”过程当中,表明在车站结构受到地震作用下残余变形随着时间的变化而变化。但是从结构变形量的分析可知,在整个地震波作用过程中,车站结构仍然以弹性变形为主导。



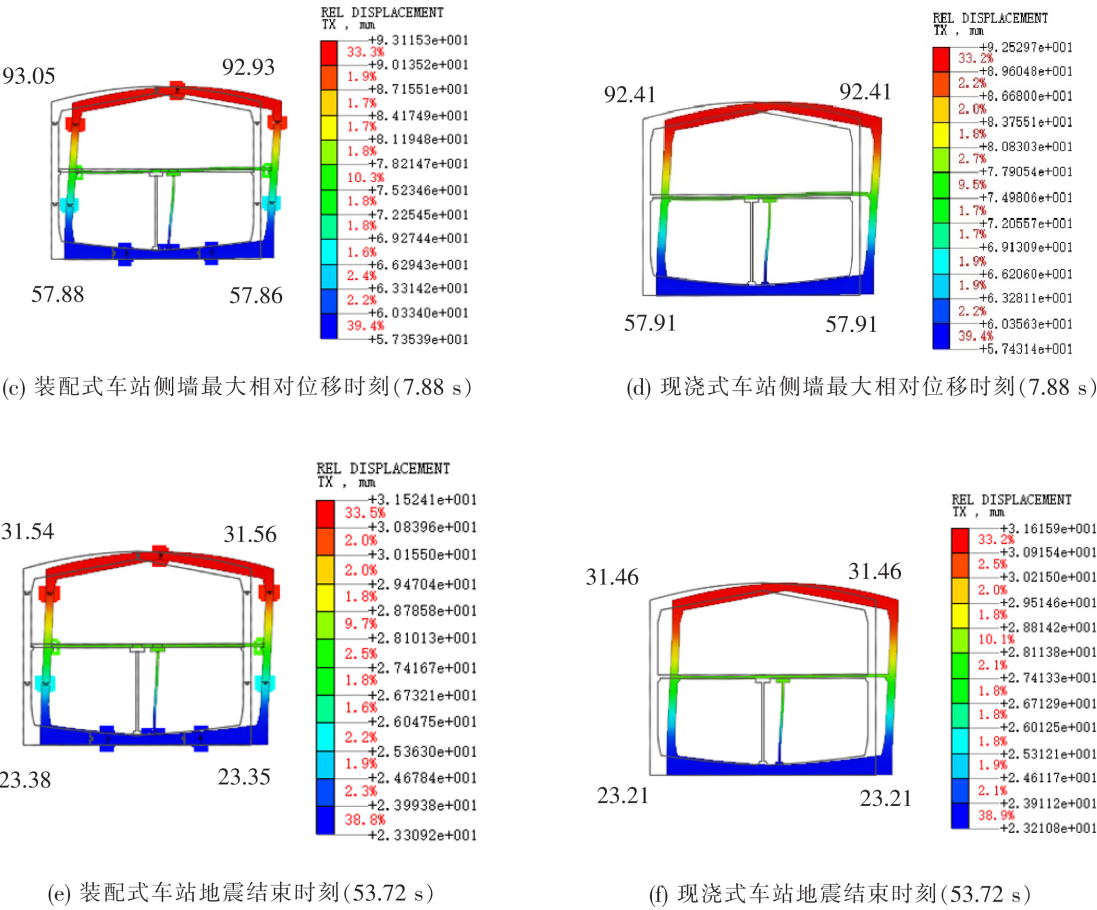


图 5 2 种地铁车站的地震响应(单位:mm)

结构的层间位移角是评判结构抗震性能的重要指标之一,根据《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)的规定,地铁车站的层间位移角限值 $[\theta_p]$ 宜取 1/250。因此,基于上述数值模拟的结果,利用层间位移角来评价 2 种地铁车站结构的水平向抗震性能(如表 2 所示)。

表 2 水平向人工波作用下车站层间位移角

部位	左侧墙层间位移角			右侧墙层间位移角		
	装配式	现浇式	相对差值/%	装配式	现浇式	相对差值/%
上层	1.75×10^{-3}	1.66×10^{-3}	5.42	1.76×10^{-3}	1.66×10^{-3}	6.02
下层	2.43×10^{-3}	2.34×10^{-3}	3.85	2.42×10^{-3}	2.34×10^{-3}	3.42

注:相对差值即 2 种结构层间位移角差值的绝对值与现浇式结构层间位移角的比值。

由表 2 分析可知,在水平向人工地震波作用下,装配式车站的层间位移角比现浇式车站大 3%~6%,即装配式车站水平向抗震能力约为相同形式现浇车站的 95%,且最大层间位移角均未超过 1/250 这一规范限值。这表明在水平向人工地震波作用下,装配式地铁车站的水平向抗震能力虽然较现浇式地铁车站有所降低,但仍然具有良好的水平向抗震性能,满足抗震设计规范要求。

3.1.2 车站结构竖向地震响应对比分析

大开地铁车站的震害现象揭示出层板在竖向的挠曲变形是造成地铁车站竖向破坏的重要因素,所以对地震作用下车站结构层板的竖向变形分析是非常有必要的。在数值计算过程中,以 TY 方向(竖直方向)结构的相对变形量来评判层板的破坏。结果揭示:在水平向地震波作用下,2 种车站结构产生的竖向地震响应同步,但装配式结构的层板挠度变形值小于现浇式结构,即装配式地铁车站具有较强的竖向抗

震能力。见图 6。

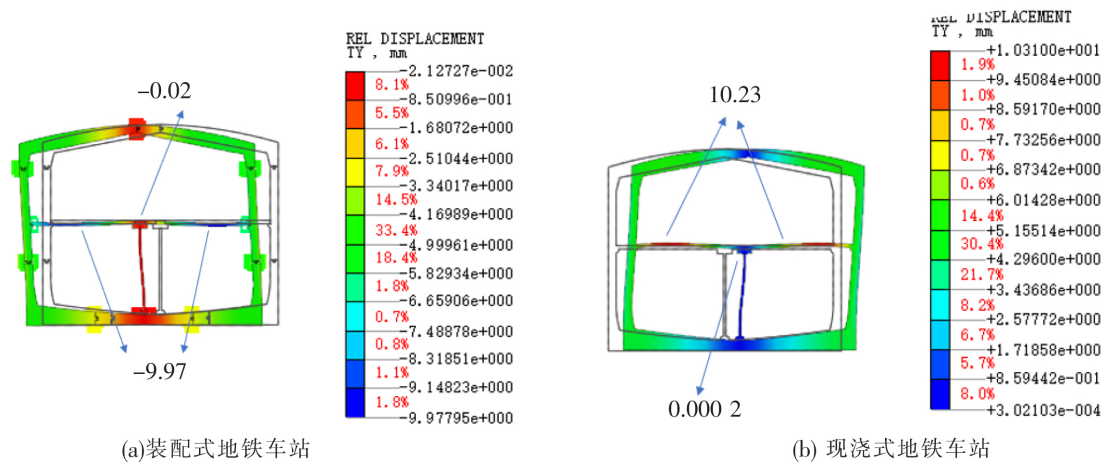


图 6 竖向最大位移时刻的 2 种地铁车站结构

层板的变形分析仅可以定性地评价地下结构竖向抗震性能,提出能够对地下结构竖向抗震性能定量评价的指标是非常迫切的。因此,为定量评价地下结构的竖向抗震性能,结合定量判断层间位移角的概念和层板在竖向的变形特性,提出了利用竖向偏离指数 Vertical Deviation Index (VDI)来定量判断地下结构竖向抗震能力。其定义为

$$VDI=\frac{h_{\max }}{L}$$

(1)

式中, $h_{\max }$ 为层板的最大相对位移; L 为层板的长度。以预制装配式构件的单榀接头脱离榀槽时的变形为极限破坏限值,再综合适当的容许因素,宜采用 $VDI=1/500$ 作为控制指标。它具体反映了结构的竖向抗震能力,其值的大小很大程度上取决于层板和立柱的材料特性和力学特性。对大开地铁车站其结构在竖向遭受到的震害现象进行分析,结果表明:竖向偏离指数 VDI 这一指标可合理评判地下结构竖向抗震性能^[19-20]。

由表 3 分析可知,2 种地铁车站在水平向人工地震波全程的作用下,层板产生的最大竖向偏离指数均未超过 1/500 这一控制指标,表明 2 种形式的车站结构在水平方向人工波的作用下均满足竖向抗震要求。同时,在水平向人工地震波作用下,装配式地铁车站竖向偏离指数约为相同形式现浇式地铁车站的 95%,因此装配式结构较现浇式结构在竖向抗震性能上具有较大的优势。

表 3 水平向人工波作用下车站层板竖向偏离指数

结构	最大位移/mm	竖向偏离指数	相对差值/%
装配式	9.95	1.02×10^{-3}	4.90
现浇式	10.23	1.07×10^{-3}	4.90

注:相对差值即 2 种车站结构竖向偏离指数差值的绝对值与现浇式结构竖向偏离指数的比值。

3.2 竖向地震波作用

为考察竖向地震动作用下 2 种地铁车站抗震性能的差异,对仅在竖向人工地震波作用下的 2 种地铁车站地震响应情况进行了对比分析。动力数值模型的参数与前述水平向地震动作用时的工况相同。

由表 4 分析可知,在竖向人工地震波作用下,2 种车站结构的侧墙产生的层间位移角虽然相差较大,但是其实际变形量对车站结构产生的影响可以忽略不计,因此可以不考虑水平方向的影响。

表 4 竖向人工地震波作用下车站层间位移角

结构部位	左侧墙层间位移角			右侧墙层间位移角		
	装配式	现浇式	相对差值/%	装配式	现浇式	相对差值/%
上层	1.76×10^{-5}	9.94×10^{-5}	82.29	8.27×10^{-5}	1.01×10^{-4}	18.12
下层	0.62×10^{-5}	3.32×10^{-5}	81.33	2.09×10^{-5}	3.25×10^{-5}	35.69

由表 5 分析可知,尽管竖向地震波加速度峰值仅为水平向地震波加速度峰值的 60%,但 2 种车站结构在竖向仍然产生了较大变形,装配式结构的竖向偏离指数仅为现浇式的 40.50%,证明了装配式结构在竖向抗震性能上具有的巨大优势。

表 5 竖向人工地震波作用下车站层板竖向偏离指数

车站类型	最大位移/mm	竖向偏离指数	相对差值/%
装配式	1.40	0.15×10^{-3}	59.50
现浇式	3.50	0.37×10^{-3}	59.50

3.3 水平-竖向耦合地震波作用

结构的地震反应是各个方向地震分量共同作用的结果,既有水平向的分量,也有竖向的分量,是复杂的三维空间运动。因此,在对 2 种单向地震作用分析的基础上,同时输入水平向和竖向人工地震波形成水平-竖向耦合波对 2 种地铁车站的变形规律进行分析和讨论。

由表 6 分析可知,水平-竖向耦合人工地震波作用下的装配式地铁车站的层间位移角比现浇地铁车站大 3%~6%,即水平-竖向耦合地震作用下装配式车站水平向抗震能力约为相同形式现浇地铁车站的 95%,且最大层间位移角均未超过 1/250 这一规范限值。表明在水平-竖向耦合人工地震波作用下,该装配式地铁车站结构虽然较现浇式结构在水平向抗震性能有所降低,但是仍然能较好地满足抗震设计规范要求。

表 6 水平-竖向耦合人工地震波作用下车站层间位移角

结构部位	左侧墙层间位移角			右侧墙层间位移角		
	装配式	现浇式	相对差值/%	装配式	现浇式	相对差值/%
上层	1.74×10^{-3}	1.66×10^{-3}	4.82	1.78×10^{-3}	1.68×10^{-3}	5.95
下层	2.40×10^{-3}	2.31×10^{-3}	3.90	2.45×10^{-3}	2.36×10^{-3}	3.81

由表 7 分析可知,2 种车站结构在水平-竖向耦合人工地震波作用下的全过程中,层板产生的最大竖向偏离指数均未超过 1/500 这控制值,表明 2 种形式的车站结构均满足竖向抗震要求。进一步分析,装配式车站的竖向偏离指数约为现浇式车站的 97%,表明装配式地铁车站较现浇式车站在竖向的抗震性能更好。

表 7 水平-竖向耦合人工地震波作用下车站层板竖向偏离指数

车站类型	最大位移/mm	竖向偏离指数	相对差值/%
装配式	8.80	0.92×10^{-3}	3.15
现浇式	9.10	0.95×10^{-3}	3.15

3.4 对比分析

由表 8 分析可知,耦合波作用下 2 种车站产生的平均水平向位移比单一波作用下产生的平均水平向位移的直接相加值小约 2.70%。这说明不同方向的波在叠加时会产生一定的“抵消”作用,这种抵消作用对结构来说是有利的,其减弱了地震波对车站结构的影响。进一步分析可知,“抵消”作用的产生是由于不同波之间产生了干涉效应,导致耦合波的峰值加速度减小。相较于现浇式车站,装配式地铁车站抵抗水平向位移的“抵消”作用能力更强,其水平位移减小量较现浇式地铁车站减少约 1.83%。

表 8 2 种地铁车站结构在 3 种不同人工地震波作用下的水平向位移

部位	车站类型	左侧墙相对最大位移(TX/mm)		相对差值/%	右侧墙相对最大位移(TX/mm)		相对差值/%
		单一波直接相加	耦合波		单一波直接相加	耦合波	
上部	装配式	15.40	15.00	2.60	15.90	15.40	3.14
	现浇式	15.30	14.40	5.88	15.30	14.50	5.23
下部	装配式	21.40	21.10	1.40	21.50	21.50	0
	现浇式	20.90	20.30	2.87	20.90	20.80	0.48

注:相对差值即单一波直接相加的结果和耦合波结果的差值的绝对值与单一波直接结果的比值。

由表 9 分析可知,与不同向单一地震波对地铁车站水平向产生的“抵消”作用相类似,地震波在结构叠加时,同样会产生一定的“抵消”作用。对比单一波对车站结构产生的竖向位移相加值,耦合波产生的位移减少 27.85%。进一步分析,装配式地铁车站抵抗竖向位移的“抵消”作用能力更强,其竖向位移减小量较现浇式地铁车站减少约 11.46%。

表 9 2 种车站 3 种不同人工地震波作用下的竖向位移

车站类型	位移值(TY/mm)		相对差值/%
	单一波直接相加	耦合波	
装配式	11.30	8.80	22.12
现浇式	13.70	9.10	33.58

注:相对差值即单一波直接相加的结果和耦合波结果的差值的绝对值与单一波直接相加结果的比值。

4 结论

(1)地铁车站在水平向人工地震波作用下的动态响应全过程表明,在地震波作用下,2 种地铁车站变形均是以弹性变形为主导、残余变形为辅的混合变形。残余变形在各个阶段中不断叠加,相对变形既有增大也有减小。

(2)在水平向人工地震波作用下,2 种地铁车站无论是在水平向还是竖向的变形均满足抗震要求。其中装配式地铁车站层间位移角较现浇式地铁车站增加了约 5%,表明其在水平向的抗震能力较弱。但其竖向偏离指数较现浇式车站减少了约 5%,具有较强的竖向抗震能力。

(3)在竖向人工地震波作用下,2 种地铁车站在水平向产生的变形均可以忽略,破坏主要以竖向的变形为主。在竖向,装配式地铁车站的竖向偏离指数仅为现浇式地铁车站抗震性能的 40.50%,证明了装配式地铁车站在竖向抗震性能上具有的巨大优势。

(4)在水平-竖向耦合人工地震波作用下,2 种地铁车站无论是在水平向还是竖向的变形均满足抗震要求。其中装配式车站的层间位移角较现浇式车站增加了约 5%,表明其水平向抗震能力较弱。但其竖向偏离指数较现浇式地铁车站减少了约 3%,具有较强的抗震能力。

(5)不同方向的波叠加时会产生一定的“抵消”作用,减弱对结构的影响,水平向位移减少约 2.70%,竖向位移减少更是达到了 27.85%。同时,装配式结构较现浇式结构在“抵消”作用下表现得更加稳定,其受到的水平向和竖向抵消位移量较现浇式结构分别减少了 1.83%和 11.46%。

参 考 文 献

- [1]刘建洪. 明挖装配式地铁车站结构设计优化及施工过程力学特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.
- [2]汪珂,贺思悦,赖金星,等. 黄土地区岛式地铁车站地震反应的数值分析[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2017:1-6(2017-09-30)[2019-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1430.N.20170930.1110.002.html>.
- [3]陈国兴,陈苏,杜修力,等. 城市地下结构抗震研究进展[J]. 防灾减灾工程学报,2016,36(1):1-23.
- [4]杜修力,李洋,许成顺,等. 1995 年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展[J]. 岩土工程学报,2018,40(2):223-236.
- [5]李习伟,刘强. 预制装配式地铁车站单榀槽式接头抗弯刚度影响因素分析[J]. 铁道标准设计,2016,60(8):113-117.
- [6]郑宏,刘二浩. 梁腹板局部削弱新型钢节点抗震性能研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(1):25-30.
- [7]温玉辉. 粤东强震区公路隧道抗震设计分析[J]. 公路,2014,59(2):210-215.
- [8]崔玉萍,孙泽泽,董军,等. 基于长期损伤累积作用下隧道结构的抗震动力学分析[J]. 公路,2013(1):284-288.
- [9]陶连金,刘春晓,边金,等. 大跨度 Y 形柱地铁车站结构地震反应研究[J]. 力学学报,2017,49(1):55-64.
- [10]王德超,王国富,乔南,等. 预制装配式结构在地下工程中的应用及前景分析[J]. 中国科技论文,2018,13(1):115-120.
- [11]李兆平,苏会锋,吕书清,等. 装配式地铁车站结构双榀槽式接头抗弯力学性能试验研究[J]. 土木工程学报,2017,50(S2):28-32.

- [12]杜修力,刘洪涛,许成顺,等. 不同轴压比下装配整体式地铁车站拼装柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(11):11-19.
- [13]赵士永,褚少辉,张玉敏. 装配式圈梁构造柱砌体结构抗震性能研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2019,32(1):30-35.
- [14]李兆平,李守庆,苏会锋. 装配式地铁车站结构双榀槽接头抗弯刚度研究[J]. 土木工程学报,2017,50(S1):14-18.
- [15]Ding Peng, Tao Lianjin, Yang Xiuren, et al. Three-dimensional dynamic response analysis of a single-ring structure in a prefabricated subway station[J]. Sustainable Cities and Society,2019,45: 271-286.
- [16]杨秀仁,黄美群. 地铁车站预制装配新技术研究策略[J]. 都市轨道交通,2018,31(1):78-85.
- [17]张喻捷. 套筒连接装配式地铁车站结构三维抗震性能评价方法研究[D]. 北京:北京工业大学,2016.
- [18]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.
- [19]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.
- [20]Soo Kyoung Ha, Sung Yong Yu, Jae Suk Kim. Experimental study on existing reinforced concrete frames strengthened by T-type precast concrete wall panels to earthquake-proof buildings[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(9): 3579-3591.

Numerical Analysis of Seismic Response for Fabricated Subway Station

Qin Yiwen¹, Yang Tao^{1,2}, Guo Haotian¹, Yuan Chaowei¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Sichuan Dujinshandi Railway Transportation Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: To explore the seismic response of the fabricated subway station under the action of seismic waves in different directions, a fabricated subway station in Changchun was taken as the sample background. The seismic responses of fabricated and cast-in-place subway stations under horizontal, vertical and horizontal-vertical coupled artificial seismic waves were analyzed respectively by dynamic finite element method. The results show that: (1) The fabricated station has better vertical anti-seismic performance than the cast-in-place station, but its horizontal anti-seismic performance is relatively weak. (2) When waves in different directions are superimposed, a certain degree of "offset" will occur. Compared with the cast-in-place station, the fabricated station presents more stable performance under the action of "offset". (3) The fabricated subway station meets the requirements of anti-seismic safety in general.

Key words: subway station; fabricated structure; seismic response; numerical analysis