

十字交叉换乘地铁车站地震响应分析

苏健¹,李达琨¹,许民泽²,崔春义²,赵经彤²

(1. 大连海洋大学海洋与土木工程学院,辽宁 大连 116023;2. 大连海事大学土木工程系,辽宁 大连 116026)

摘要 目的 研究十字交叉换乘地铁站在抗震分析中地震动荷载对结构动力响应的影响,为十字交叉车站的抗震设计和分析提供参考。方法 以十字交叉换乘地铁站为研究对象,借助 MIDAS-GTS 建立三维有限元分析模型,采用动力时程方法分析水平与竖向地震动荷载下车站结构的地震响应规律,并将单向与双向耦合地震动荷载下的结构响应进行比较。结果 双向地震动荷载下,结构响应规律与单向地震动相似,但结构水平位移增幅为 1.44%,竖向位移增幅为 1.21%;层间位移角比水平地震动增加了 12%,比竖向地震动增加了 1 876%;结构加速度响应在水平向增加了 4.1%,在竖向减少了 2.8%。结论 在双向地震动荷载下,结构的地震响应增大,产生的动力效应更大,对结构损伤更大;顶板的加速度峰值最大,最易受损;由于 ρ - Δ 效应,结构水平向地震响应增大,竖向地震响应减小。

关键词 十字交叉换乘站;动力时程分析;地震响应; ρ - Δ 效应

中图分类号 TU93;U231+.4

文献标志码 A

Seismic Response Analysis of Cross Transfer Subway Station

SU Jian¹, LI Dakun¹, XU Minze², CUI Chunyi², ZHAO Jingtong²

(1. Department of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian, China, 116023; 2. Department of Civil Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, 116026)

Abstract: In order to study the influence of the vertical ground seismic load on the dynamic response of the structure in the seismic analysis of the cross transfer subway station, it can provide some reference for the seismic analysis of the cross-transfer subway station. Taking the structure of an underground three-layer cross transfer subway station as the research object, a three-dimensional finite element analysis model is established by using the finite element software MIDAS-GTS. Considering the nonlinearity of soil, the dynamic time history analysis method is used to analyze the seismic response law of the cross transfer station structure under horizontal and vertical ground motions, and compared the response of the structure under unidirectional and bidirectional coupling

收稿日期:2023-02-13

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52178315);中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132019349)

作者简介:苏健(1982—),男,博士,主要从事土木工程计算与分析等方面研究。

ground motions. Under the action of bidirectional seismic loads, the dynamic response of the structure is similar to that of unidirectional seismic loads, but the average increase in horizontal displacement of the structure is 1.44%, and the average increase in vertical displacement is 1.21%; The interlayer displacement angle increased by 12% compared to horizontal seismic motion and 1 876% compared to vertical seismic motion; The structural acceleration response increases by 4.1% horizontally and decreases by 2.8% vertically. Under the coupling effect of bidirectional seismic loads, the seismic response of the structure significantly increases, resulting in greater dynamic effects and ultimately causing greater damage to the structure; The peak acceleration of the top plate is the largest and most susceptible to damage; Due to the effect, the horizontal seismic response of the structure increases, while the vertical seismic response decreases.

Key words: cross over transfer subway station; dynamic time-history analysis; seismic response; ρ - Δ effect

地铁车站作为城市交通的重要组成部分,受地震荷载影响破坏巨大,且由于其建造成本高昂,遭到破坏后的修复工作极其困难。随着国内地铁迅速发展,地铁线路网络愈发复杂,使换乘地铁车站越发普遍,其中较为普遍的结构形式为十字交叉式,即一个车站布置在另一个车站上部。换乘车站相比普通车站的地震响应更加复杂,在工程设计过程中需要格外重视。

关于地下结构抗震问题,国内外学者已经取得诸多成果。崔春义等^[1]利用两相介质动力分析方法和多指标综合平衡法对饱和软土地基-地铁车站结构体系进行耦合动力数值分析,为地震规律和抗震设计提供参考。王国波等^[2]基于 MIDAS 分析了水平地震动作用下十字换乘车站结构的地震响应规律,并对比其与单体车站的响应差别,探究了换乘车站的空间效应。邓泽涵^[3]以某地铁车站为背景,考虑水平及竖向地震动耦合作用的效果,分析了地铁车站结构的地震响应问题,验证车站结构设计满足抗震性能需求,并提出地铁车站结构抗震设计的关键点。陈磊等^[4]基于 ABAQUS 探究了三拱立柱式地铁地下车站结构在地震动荷载作用下车站结构的动力响应规律,发现车站的破坏主要和结构相对位移角有关,其破坏模式主要为剪切破坏。胡建平等^[5]运用 ADINA 建立模型,

分析了衬砌厚度变化对浅埋交叉隧道地震反应的影响,提出了诸如增加覆土厚度、提高衬砌厚度之类的相应减震措施。陈磊等^[6]基于 ABAQUS 建立了双层交叉隧道结构的三维非线性有限元模型,研究了在近场强地震动作用下结构相互作用对自身的地震响应规律,并与不同埋深单层隧道进行对比。周川等^[7]基于 ABAQUS 子程序提出等效线性方法,通过车站结构的抗震分析,将该方法与反应位移法、拟静力法进行对比分析以验证其精确度。陈苏等^[8]针对地基土-变截面地铁车站结构进行了三维非线性地震响应分析,结果表明,上宽下窄变截面结构的下层地震响应大于上层,结构具有明显空间效应。庄海洋等^[9]利用 ABAQUS 开发了土体非线性黏弹性模型和混凝土动力塑性损伤模型,并基于此对两层双柱岛式地铁车站结构进行了模拟分析,研究发现此结构中柱和中板为最不利位置。黄瑞财等^[10]分别建立换乘车站二维和三维有限元模型,分析了地铁换乘车站在地震作用下节点处的应力、位移响应,以及水平、竖向及三向耦合地震波输入对换乘节点位移及应力响应影响。施正城^[11]基于 MIDAS 建立了具有黏性边界的地铁车站与区间隧道过渡段三维数值模型并分析其抗震性能,研究表明仅依靠增加结构的刚度来提高结构抗震性能效果并不明显,且会造成

应力集中现象。贾要红^[12]利用 ANSYS 对浅埋三层三跨平行换乘车站进行抗震性能分析,结果表明竖向地震对结构动力响应的影响不可忽视。于仲洋^[13]对十字交叉换乘车站和 H 型短通道平行换乘两种车站进行振动台试验与数值模拟,分析了换乘车站结构与周围土体间的相互作用特性,并提出了适用于此类车站的三维拟静力抗震简化分析方法。

综上所述,已有研究中对于十字交叉换乘车站的地震响应分析较少,特别是针对不同方向地震动荷载对换乘车站影响的研究更少。鉴于高烈度地震区域中竖向地震动荷载可能改变结构的最不利位置^[14],笔者以十字交叉换乘地铁车站为研究对象,借助 MIDAS-GTS 建立三维有限元分析模型,采用动力时程分析法分析水平与竖向地震动荷载下车站结构的地震响应规律,并将单向与

双向耦合地震动荷载下的结构响应进行比较,以期对十字交叉车站的抗震设计和分析提供参考。

1 结构有限元模型

1.1 计算范围及边界条件

笔者基于有限元分析软件 Midas-GTS 建立三维有限元模型进行分析。所建立的十字交叉换乘地铁车站纵向方向取三层双柱三跨的框架结构,横向方向取两层双柱三跨的框架结构。车站顶板覆土深度为 2 m,车站纵向横向简化为相同长度,取 80 m,车站截面宽 16 m,每层高 3 m,车站顶板、底板厚 800 mm,中板厚 400 mm,侧墙厚 800 mm,中柱截面为矩形,边长为 900 mm,柱子间距 5 m。顶板、底板以及侧墙均采用钢筋混凝土结构,混凝土等级为 C40。计算模型如图 1 所示。

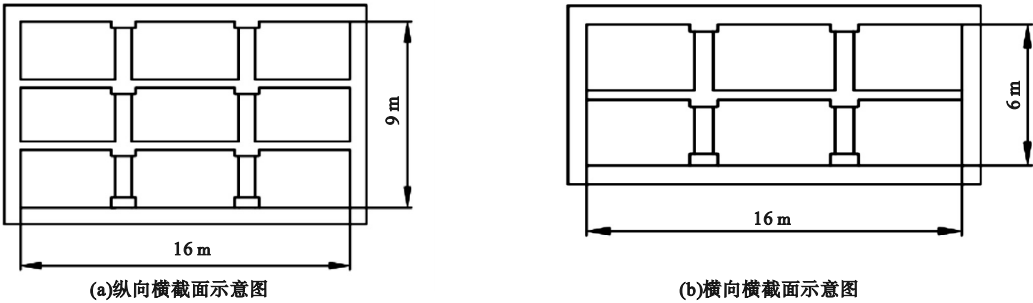


图 1 车站截面示意图
Fig. 1 Schematic diagram of station section

土体采用实体单元,共有 145 656 个,本构为 Mohr-Coulomb 本构模型;墙和板采用壳单元,共有 10 208 个;梁和柱采用梁单元,共有 618 个。模型四周采用二维自由场,底部采用固定约束。模型单元划分如图 2 所示。

对于十字交叉车站结构,为更明显反映其在不同方向地震动作用下的响应规律,选取车站顶板以及车站下层楼板布置监测节点,由于车站结构左右对称,故只在中跨和一侧边跨布置节点来分析结构的响应规律。节点布置见图 3。

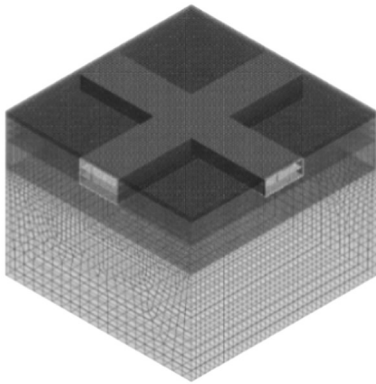


图 2 土层模型及单元划分图
Fig. 2 Soil model and mesh diagram

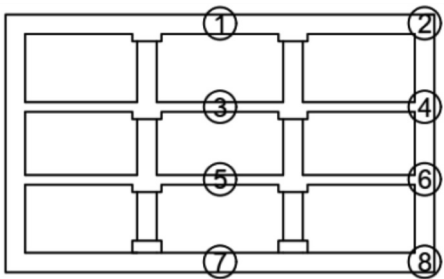


图3 车站节点分布图

Fig.3 Nodes distribution diagram of subway station

表1 土层参数

Table 1 Soil parameters

材料	重力密度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	泊松比
杂填土	17.2	23.4	15	29.3	0.30
粉质黏土	19.4	28.4	18	25.4	0.32
砾砂	19.7	48.4	25	41.2	0.24
中粗砂	20.6	53.1	25	32.0	0.31
强风化岩	28.2	113.1	38	32.0	0.30

1.2 地震波时程曲线

进行地震响应分析时,选取 Taft 波以及 EL Centro 波,分别用做水平向及竖直向地震波,并以车站结构两层三跨所在方向为水平方向。

在抗震分析中应对选用的地震加速度峰值按比例进行适当的放大或缩小,使之与设防烈度相应的地震(如多遇地震与罕遇地震)的加速度峰值一致。

加速度峰值按照式(1)调整:

$$a'(t) = \frac{a'_{\max}}{a_{\max}}a(t).$$
 (1)

式中: $a(t)$ 、 a_{\max} 分别为原始的加速度时程及峰值; $a'(t)$ 、 a'_{\max} 分别为调整后地震加速度时程及峰值。

文中设抗震设防烈度为 7 度,根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)^[16],设计水平地震加速度值为 0.15 g,竖向峰值加速度与水平向峰值加速度的比值为 0.7^[17]。

经调整后,Taft 波 $\frac{a'_{\max}}{a_{\max}}$ 的地震动加速度系数为 0.836;EI Centro 波 $\frac{a'_{\max}}{a_{\max}}$ 的地震动加速度系数为 0.219。两个地震波的加速度时程

根据文献[15],土体的横向计算宽度取车站结构宽度的五倍,车站结构两侧的土体宽度均为结构宽度的两倍,深度方向则取至基岩面,可减少边界效应的影响。因此,十字交叉换乘车站的计算范围 $80\text{ m}\times 80\text{ m}\times 61.5\text{ m}$ 。车站结构范围内土层分布依次为杂填土、粉质黏土、中粗砂、砾砂和强风化岩。土体参数见表 1。

曲线如图 4、图 5 所示。

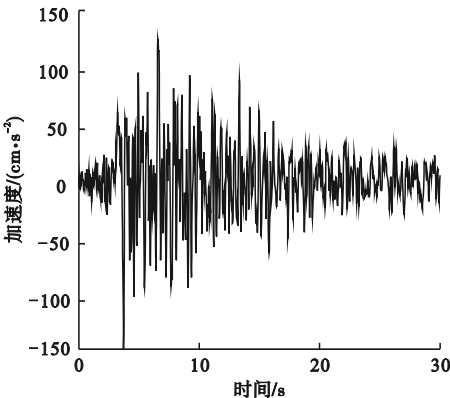


图4 水平地震波时程曲线

Fig.4 Horizontal seismic wave time history curve

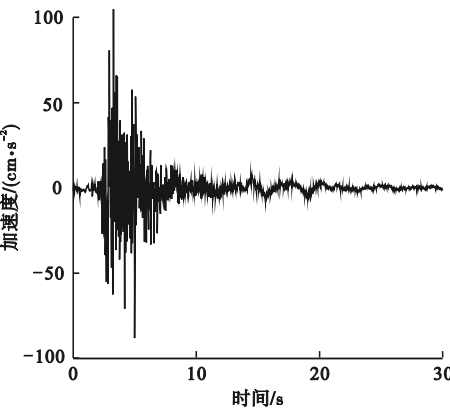


图5 竖向地震波时程曲线

Fig.5 Vertical seismic wave time history curve

2 计算结果与分析

2.1 位移分析

已有研究表明,地下结构的破坏大多是由周围土体的变形施加在结构上所导致的,所以地下结构的变形分析在地下结构抗震分析中显得尤为重要。其中,水平方向地震作用对结构破坏程度最为严重,因此首先对单一水平地震动荷载作用下结构响应的变化规律进行分析,水平位移时程曲线如图6所示。

从图6可以看出,各节点的时程曲线规律基本一致,与输入地震波的波形曲线类似,结构在同一水平方向上的水平位移基本相同,其中顶板位移最大,底板位移最小,水平位移沿着车站高度方向变化较大,呈现随高程增加而增大的规律。在水平地震动荷载下,结构的最大相对水平位移为83.7 mm,发生时刻为4.25 s。车站结构主体的位移基本对称,同一高度的相同部位差别较小,且结构

顶板位移最大。

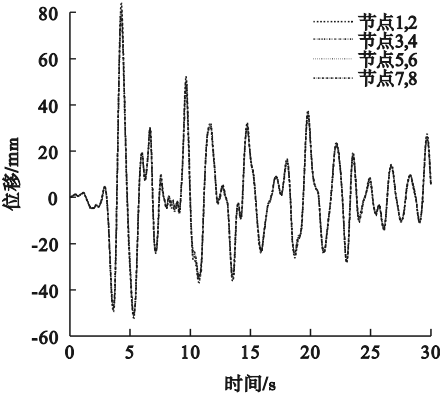


图6 水平位移时程曲线

Fig. 6 Time history curves of horizontal displacement
在单向地震动荷载分析的基础之上,耦合水平与竖向地震动荷载,进行模拟分析,得到水平和竖直双向地震动荷载下车站结构的位移响应,结果见表2。从表中可以得出,在双向地震动荷载下,水平位移平均增幅为1.44%,最大增幅为1.66%;竖向位移平均增幅为1.21%,最大增幅为2.46%。

表2 车站结构关键节点的水平与竖向位移值

Table 2 Horizontal and vertical displacement values of station structure nodes					mm
节点	水平地震水平最大位移	双向地震水平最大位移	竖向地震竖向最大位移	双向地震竖向最大位移	
1	83.74	84.89	13.50	13.50	
2	83.84	84.90	13.01	13.33	
3	82.69	83.90	13.19	13.20	
4	82.77	83.91	12.99	13.31	
5	81.34	82.69	13.14	13.14	
6	81.37	82.68	12.99	13.30	
7	80.22	81.35	13.02	13.02	
8	80.25	81.35	12.99	13.29	

从位移分析可以看出,车站中跨位移较小,两端位移较大,这是因为中跨位于结构交叉部位,其刚度更大。底板的位移最小,顶板的位移最大,水平位移沿高程从下而上逐步增大。在双向地震动荷载的作用下,由于不同方向地震动荷载相互影响,导致地铁车站结构体系的水平和竖向位移均有增加,从而产生更大的动力效应,最终对结构造成更大的损伤。

在水平和竖直双向地震动荷载下,车站结构各节点的水平位移时程变化规律如图7所示,竖向位移时程变化规律如图8所示。

从图7和图8可以看出,在水平和竖向地震动荷载耦合作用下,车站结构各监测节点的位移时程变化规律与单一水平地震动荷载下基本相同;在同一结构部位,同一时刻的位移值比单一水平地震动荷载下的位移值大。

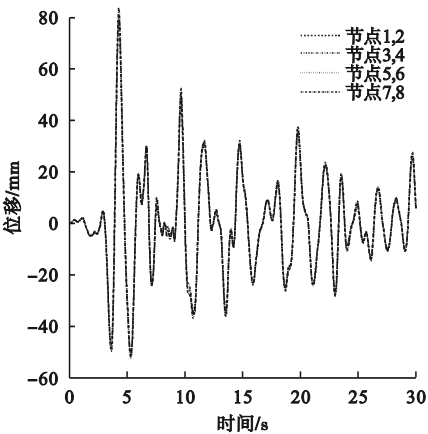


图7 各节点水平位移时程曲线

Fig. 7 Time history curves of horizontal relative displacement of each nodes

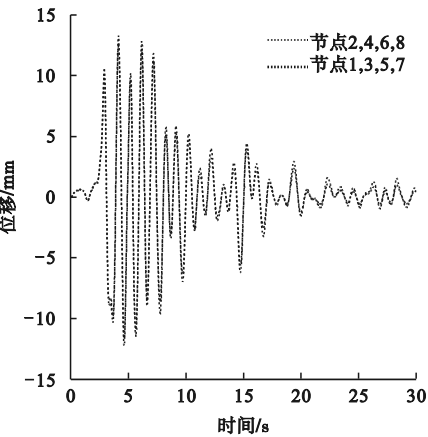


图8 各节点竖向位移时程曲线

Fig. 8 Time history curves of vertical relative displacement of each nodes

提取不同情况下结构最大层间位移角,结果见表3。从表中可以看出,十字交叉换乘车站由于整体刚度较大,其层间位移角较小。水平地震动荷载下的层间位移角明显比竖向地震动荷载下的层间位移角大,说明水平地震动荷载相对竖向地震动荷载对结构的影响更大;而双向地震动荷载下的位移角比这两种情况的位移角都要大。可见,双向地震动荷载对车站结构的影响最大,水平地震动荷载的影响次之,竖向地震动荷载的影响最小。

表3 不同情况下层间位移角

Table 3 Inter-story drift in different cases	
地震方向	位移角
竖直方向	1/47 783
水平方向	1/2 855
水平竖直	1/2 546

2.2 加速度分析

节点1的水平加速度时程曲线如图9所示,竖向加速度时程曲线如图10所示。水平地震动荷载下,节点的加速度波形与输入地震波的波形基本一致,但在地震波的传递过程中,对输入基岩加速度幅值进行了放大,地铁车站顶板的加速度最大,其中节点1峰值为116.04 cm/s²,节点2峰值为116.1 cm/s²(见表4)。

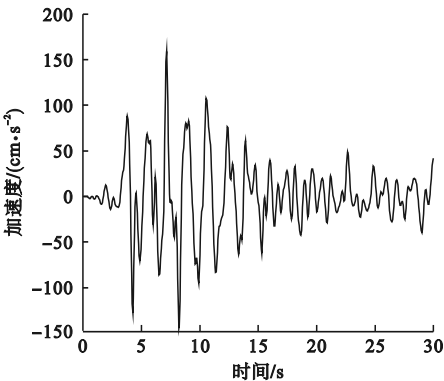


图9 节点1水平加速度时程曲线

Fig. 9 Node 1 horizontal acceleration time history curve

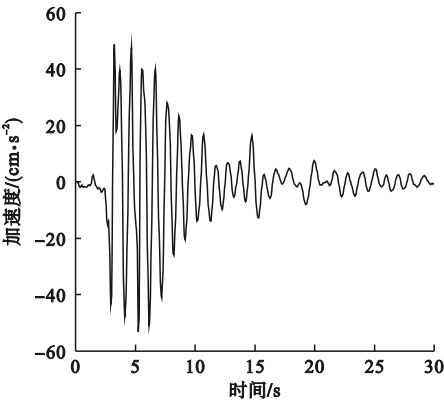


图10 节点1竖向加速度时程曲线

Fig. 10 Node 1 vertical acceleration time history curve

表4 水平地震作用下主要节点的加速度幅值

Table 4 The acceleration amplitude of main nodes under horizontal seismic action cm/s^2

节点	加速度幅值	节点	加速度幅值
1	116.0	5	108.5
2	116.1	6	108.5
3	111.8	7	104.8
4	112.6	8	104.8

水平地震动荷载下,结构加速度自下而

表5 车站结构在不同向地震作用下各节点的加速度幅值

Table 5 Acceleration amplitude of each node under different seismic directions

节点	水平地震下加速度		竖向地震下加速度		双向耦合地震下加速度			
	最大值/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	放大系数	最大值/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	放大系数	水平最大值/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	放大系数	竖向最大值/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	放大系数
1	156.11	1.06	54.19	0.53	159.05	1.08	53.17	0.52
2	154.74	1.05	58.48	0.57	159.16	1.08	57.45	0.56
3	148.96	1.01	53.48	0.52	153.38	1.04	52.42	0.51
4	147.57	1.00	58.55	0.57	153.47	1.04	57.52	0.56
5	138.22	0.94	54.22	0.53	145.58	0.99	52.17	0.51
6	138.19	0.94	58.69	0.57	145.55	0.99	57.66	0.56
7	130.82	0.89	53.05	0.52	136.70	0.93	51.01	0.50
8	129.32	0.88	60.53	0.59	136.67	0.93	57.45	0.56

在水平和竖向地震动荷载下,换乘车站结构各节点水平加速度值大于单一水平地震动荷载作用时的加速度值,而换乘车站结构各节点竖向加速度小于单一竖向地震动荷载作用时的加速度值,这是因为双向地震动荷载耦合作用下,侧向变形下发生了重力二阶效应($\rho-\Delta$ 效应),产生了附加弯矩,增大了水平向的地震响应,抑制了竖向地震响应。

3 结 论

- (1)单一水平地震动荷载下,各节点的位移时程曲线规律基本一致,结构位移呈左右对称,同一高度的位移差较小,不同高度的位移差较大,水平位移沿高程从下而上逐步增大,底板位移最小,顶板位移最大。
- (2)在水平与竖向地震动荷载耦合作用下的结构响应与单一地震动荷载下的响应规律基本相同,但在同一位置,水平和竖向位移均有增加,从而产生更大的动力效应,最终对

上随着高度不断增大,在同一高度,结构的加速度基本一致。车站顶板处,结构的加速度峰值约是底板加速度峰值的1.1倍,故顶板受到的激振力比较大,最容易受到破坏。无论是单一水平地震动荷载还是水平和竖向地震动荷载耦合作用,换乘车站结构的水平加速度放大系数均大于竖向加速度放大系数(见表5)。

- 结构造成更大的损伤。
- (3)双向地震动荷载下的层间位移角最大,水平地震动荷载下的层间位移角次之,竖向地震动荷载下的层间位移角最小。可见,双向地震动荷载对车站结构的影响最大,水平地震动荷载的影响次之,竖向地震动荷载的影响最小。
- (4)水平地震动荷载下,在同一高度,结构的加速度基本一致;在不同高度,加速度自下而上不断增大,顶板的加速度峰值约是底板的1.1倍,故顶板受到的激振力比较大,最容易受到破坏。
- (5)在双向地震动荷载下,结构各节点水平加速度值大于水平地震动的值,而竖向加速度小于竖向地震动的值,因为侧向变形下发生了效应,产生了附加弯矩,增大了水平向的地震响应,抑制了竖向地震响应。

参考文献

[1] 崔春义,程学磊,孙宗光,等. 软基场地地铁车

- 站地震响应及参数敏感性分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(3): 92-98.
(CUI Chunyi, CHENG Xuelei, SUN Zongguang, et al. Analysis of seismic response and parametric sensitivity of subway station surrounded by saturated soft soil [J]. Journal of railway engineering society, 2017, 34(3): 92-98.)
- [2] 王国波, 余森坤, 袁明智, 等. 十字换乘地铁车站结构地震响应分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1227-1234.
(WANG Guobo, YU Miaokun, YUAN Mingzhi, et al. Seismic response analysis of cross metro transfer station structure [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019, 41(7): 1227-1234.)
- [3] 邓泽涵. 基于时程分析法的地铁地下车站抗震设计与分析[J]. 工程技术研究, 2018, 16: 1-4.
(DENG Zehan. Seismic design and analysis for underground metro station based on time-history analysis method [J]. Engineering and technology research, 2018, 16: 1-4.)
- [4] 陈磊, 陈国兴, 陈苏, 等. 三拱立柱式地铁地下车站结构三维精细化非线性地震反应分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(11): 100-107.
(CHEN Lei, CHEN Guoxing, CHEN Su, et al. 3D refined nonlinear analysis on seismic responses of three-arch and two-column subway station structure [J]. Journal of the China railway society, 2012, 34(11): 100-107.)
- [5] 胡建平, 刘亚莲. 浅埋交叉隧道地震动力响应及减震措施研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 759-765.
(HU Jianping, LIU Yalian. Analysis on the seismic dynamic response and shock-absorption measures of shallow-burial cross tunnels [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(3): 759-765.)
- [6] 陈磊, 陈国兴, 龙慧. 地铁交叉隧道近场强地震反应特性的三维精细化非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3971-3976.
(CHEN Lei, CHEN Guoxing, LONG Hui. 3D refined nonlinear finite element analysis of intersecting metro tunnels under near-field ground motion [J]. Rock and soil mechanics, 2010, 31(12): 3971-3976.)
- [7] 周川, 焦玉勇, 张国华, 等. 等效线性方法在地铁车站抗震分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊2): 518-525.
(ZHOU Chuan, JIAO Yuyong, ZHANG Guohua, et al. Application of equivalent linear method in the subway station seismic analysis [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(S2): 518-525.)
- [8] 陈苏, 唐柏赞, 刘爱文, 等. 变截面地铁地下车站三维地震反应特性数值模拟[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(5): 41-48.
(CHEN Su, TANG Baizan, LIU Aiwen, et al. 3-D numerical simulation on seismic behavior of variable crosssection subway station structure in complex geological ground [J]. Seismological and geomagnetic observation and research, 2016, 37(5): 41-48.)
- [9] 庄海洋, 陈国兴, 胡晓明. 两层双柱岛式地铁车站结构水平向非线性地震反应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(增刊1): 3074-3079.
(ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing, HU Xiaoming. Analysis of nonlinear earthquake response of two-layer double-column subway station structure [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2006(S1): 3074-3079.)
- [10] 黄锐财. 地铁车站换乘节点地震响应分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
(HUANG Ruicai. Seismic response analysis of subway station transfer nodes [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.)
- [11] 施正城. 地铁车站与区间隧道过渡段的抗震设计分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
(SHI Zhengcheng. The analysis of seismic response of the joint structure between the subway station and running tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.)
- [12] 贾要红. 地铁换乘车站多层结构地震响应分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
(JIA Yaohong. Analysis of dynamic response of structures of multideck metro station for exchanging [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.)
- [13] 于仲洋. 典型换乘地铁车站结构地震响应特性及抗震简化分析方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
(YU Zhongyang. Study on seismic response and simplified analysis method for typical transfer subway station structures [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.)
- [14] 曹炳庭, 罗奇峰. 神户大开地铁车站的地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 22(4): 102-107.
(CAO Bingzheng, LUO Qifeng. Seismic response analysis of Dakai subway station in Hyogoken-nambu earthquake [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2008, 22(4): 102-107.)
- [15] 季倩倩. 地铁车站结构振动台模型试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
(JI Qianqian. Shaking table test on metro station structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2002.)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of building: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [17] 同济大学. 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
(Tongji University. Code for seismic design of urban rail transit structures: GB 50909—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)