

地震动 SV 波斜入射下十字形地铁 换乘车站的动力响应*

马宇恒 赵慧玲

(上海大学力学与工程科学学院, 200444, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 为研究地下十字形地铁换乘车站结构在 SV 波(垂直偏振横波)斜入射下的地震反应,利用 Flac3D 软件建立地层-车站有限差分模型进行斜入射数值模拟,通过 Fish 语言编制程序,实现 SV 波斜入射时三维模型人工边界等效节点力的自动施加。对比分析了地震动垂直入射和斜入射时的车站柱顶速度时程、板和柱顶底相对位移、不同断面变形、板和侧墙的弯矩、柱顶轴力等。分析结果表明:地震动作用下十字形地铁换乘车站交叉区域的变形小于非交叉区域;顶板、底板、侧墙的内力在交叉边界处突变;SV 波斜入射时,十字形地铁换乘车站会同时发生水平剪切变形与竖向剪切变形;SV 波斜入射时,交叉区域的柱顶轴力显著大于非交叉区域;顶板的弯矩随着入射角的增大而增大。

关键词 十字形地铁换乘车站;垂直偏振横波斜入射;动力响应;人工边界

中图分类号 TU435; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.048

Dynamic Response of Cross-type Metro Interchange Station under Oblique Incidence of SV Waves

MA Yuheng, ZHAO Huiling

Abstract To study the seismic response of underground cross-type metro interchange station structure under SV wave oblique incidence, the strata-station finite difference model is established with Flac3D software, carrying out oblique incidence numerical simulation. By coding with Fish language, the automatic application of equivalent nodal forces at the artificial boundary of the 3D model during SV wave oblique incidence is implemented. Station column top velocity time-history, relative displacements of slab and column top bottom, deformation of different sections, bending moment of slab and sidewall, and column top axial force for vertical incidence and oblique incidence of ground motion are comparatively analyzed. Results show that the deformation in the intersection area of the

cross-type metro interchange station under the effect of ground motion is smaller than that in the non-intersection area. The internal forces of the top slab, bottom slab and sidewalls change abruptly at the intersecting boundary, and the horizontal shear deformation and vertical shear deformation occur simultaneously in the station when the SV wave is obliquely incident. The axial force at the top of the column in the intersection area is significantly larger than that in the non-intersection area during SV wave oblique incidence. The bending moment of the top slab increases with the increase of the incidence angle.

Key words cross-type metro interchange station; SV wave oblique incidence; dynamic response; artificial boundary

Author's address School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, 200444, Shanghai, China

地铁车站作为重要的基础设施,其抗震性能至关重要。在日本阪神地震中,大开地铁车站结构遭到严重破坏,顶板大面积坍塌,30 多根中柱受损^[1],自此,地铁车站的抗震安全性越来越受到关注。

数值模拟是开展地下结构地震分析的有效手段。在进行模拟时,需要考虑半无限边界的处理。最早的边界处理方法是将被土体边界取得足够远,从而能使被结构散射的地震波在计算时间内无法返回到结构,但这样会带来计算量过大的问题。引入局部人工边界是目前最有效的手段。文献[2]是最早根据波动方程提出了黏性边界;文献[3]在其基础上采用弹簧-阻尼集中质量系统提出了黏弹性边界;文献[4]通过强制边界节点的运动来吸收从各个方向传来的振动波,提出了位移型人工边界,即透射边界模型。这些局部人工边界可以减少波的反射,模拟波的透射。此外,数值模拟也需合理反映地震动输入。根据波动法原理^[5],地震动输入可转化为截断边界面上的等效节点力输入。在震源

* 上海市自然科学基金项目(19ZR1418700)

近场时,需要考虑地震波的斜入射,广泛采用的方法为黏性或者黏弹性边界,以及对应的等效节点荷载输入。

目前,已有一些学者对斜入射下地下结构地震反应进行了研究。文献[6]通过有限元数值分析发现,随着入射角度的增大,地铁车站柱顶轴力会不断增大,且SV波(为剪切波)作用震害明显大于P波(为压缩波)。文献[7]在考虑地震波斜入射的基础上发现,入射角度会显著影响地表沉降,中柱是地铁车站抗震的薄弱部位。文献[8]研究了SV波以超临界角斜入射时,不同类别场地条件下地铁车站地震动规律,发现地铁车站必须考虑SV波斜入射角度的影响,否则会严重低估车站的动力响应。文献[9]通过编制程序实现斜入射的有限元模拟,发现北宫门地铁站边墙、柱子主应力都随着入射角度增大的规律。本文的分析对象是十字形地铁换乘车站,由2个正交的车站形成,在地震时相互作用、相互影响。与传统的矩形断面车站相比,十字形换乘车站在交叉部位刚度明显增大,且在交叉部位可能会出现明显应力集中现象。文献[10]将数值模拟的结果和振动台试验进行对比,发现底层柱是十字形换乘车站受力的薄弱部位。文献[11]以十字形换乘换乘车站结构与单体结构进行对比,研究换乘车站的抗震性能,其研究反映了换乘车站的空间效应明显。文献[12]等基于薄板弯曲理论,发现单层交叉换乘车站的交叉部分存在影响范围阈值,且影响范围为3.0倍层间高度或1.5倍层间宽度。上述研究都是基于垂直入射,对于斜入射下十字形地铁换乘车站的动力响应特性尚缺乏系统性研究,本文重点分析斜入射对交叉部位及其影响范围内动力特性的影响。

1 基于黏性人工边界的地震波输入方法

图1为三维平面SV波斜入射时各边界波场分解示意图^[13]。地基左侧、前后侧自由场为内行场。内行场由入射SV波、反射SV波和P波叠加构成。地基地部边界自由场由内行场和外行场叠加组成,内行场由入射SV波构成,外行场由反射SV波和P波叠加构成。设 α 为入射SV波的入射角和反射SV波的反射角;设 β 为反射P波的反射角。

假定半无限地基为线弹性介质,计算节点的速度时程和应力时程。 t 时刻,左侧人工边界面处 x 向

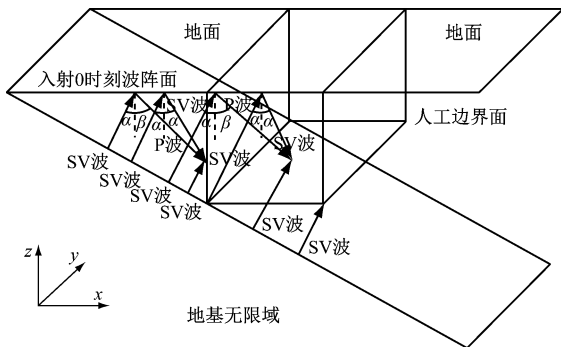


图1 三维平面SV波斜入射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a 3D plane SV wave oblique incidence

及 z 向的内行场速度 $\dot{u}_x(t)$ 及 $\dot{u}_z(t)$ 分别为:

$$\dot{u}_x(t) = \dot{u}_{sv}(t)(t-t_1)\cos\alpha - A_1\dot{u}_{sv}(t-t_2)\cos\alpha + A_2\dot{u}_{sv}(t-t_3)\sin\beta \quad (1)$$

$$\dot{u}_z(t) = -\dot{u}_{sv}(t)(t-t_1)\sin\alpha - A_1\dot{u}_{sv}(t-t_2)\sin\alpha - A_2\dot{u}_{sv}(t-t_3)\cos\beta \quad (2)$$

式中:

$\dot{u}_{sv}(t)$ —— t 时刻入射SV波的速度时程;

A_1 ——反射SV波与入射SV波的幅值的比值;

A_2 ——反射P波与入射SV波的幅值的比值;

t_1 ——入射SV波传播到左侧边界面各点的时间延迟;

t_2 ——反射SV波传播到左侧边界面各点的时间延迟;

t_3 ——反射P波传播到左侧边界面各点的时间延迟。

t 时刻,在左侧人工边界面处, x 向及 z 向的内行场应力 $\sigma_x(t)$ 及 $\sigma_z(t)$ 分别为:

$$\sigma_x(t) = \frac{G}{C_s}\sin 2\alpha[\dot{u}_{sv}(t)(t-t_1) - A_1\dot{u}_{sv}(t-t_2)] + \frac{\lambda + 2G\sin^2\beta}{C_p}A_2\dot{u}_{sv}(t-t_3) \quad (3)$$

$$\sigma_z(t) = \frac{G}{C_s}\cos 2\alpha[\dot{u}_{sv}(t)(t-t_1) + A_1\dot{u}_{sv}(t-t_2)] - \frac{G\sin 2\beta}{C_p}A_2\dot{u}_{sv}(t-t_3) \quad (4)$$

式中:

C_p ——压缩波速;

C_s ——剪切波速;

λ ——介质的一阶拉梅常数;

G ——介质的二阶拉梅常数。

t 时刻,前后人工边界面处,有:

$$\dot{u}_x(t) = \dot{u}_{sv}(t)(t-t_4)\cos\alpha - A_1\dot{u}_{sv}(t-t_5)\cos\alpha + A_2\dot{u}_{sv}(t-t_6)\sin\beta \quad (5)$$

t 时刻,在前侧人工边界面处, y 向内行场应力 $\sigma_y(t)$ 为:

$$\sigma_y(t) = -\frac{\lambda}{C_p}A_2\dot{u}_{sv}(t-t_4) \quad (6)$$

式中:

t_4 ——入射 SV 波传播到前侧边界面各点的时间延迟;

t_5 ——反射 SV 波传播到前侧边界面各点的时间延迟;

t_6 ——反射 P 波传播到前侧边界面各点的时间延迟。

后侧人工边界面的应力方向与前侧边界面应力方向相反。在底部人工边界面处,有:

$$\dot{u}_x(t) = \dot{u}_{sv}(t)(t-t_7)\cos\alpha - A_1\dot{u}_{sv}(t-t_8)\cos\alpha + A_2\dot{u}_{sv}(t-t_9)\sin\beta \quad (7)$$

$$\dot{u}_z(t) = -\dot{u}_{sv}(t)(t-t_7)\sin\alpha - A_1\dot{u}_{sv}(t-t_8)\sin\alpha - A_2\dot{u}_{sv}(t-t_9)\cos\beta \quad (8)$$

$$\sigma_x(t) = \frac{G}{C_s}\cos 2\alpha[\dot{u}_{sv}(t)(t-t_7) + A_1\dot{u}_{sv}(t-t_8)] - \frac{G\sin 2\beta}{C_p}A_2\dot{u}_{sv}(t-t_9) \quad (9)$$

$$\sigma_z(t) = \frac{G}{C_s}\sin 2\alpha[-\dot{u}_{sv}(t)(t-t_7) + A_1\dot{u}_{sv}(t-t_8)] + \frac{\lambda + 2G\cos^2\beta}{C_p}A_2\dot{u}_{sv}(t-t_9) \quad (10)$$

式中:

t_7 ——入射 SV 波传播到后侧边界面各点的时间延迟;

t_8 ——反射 SV 波传播到后侧边界面各点的时间延迟;

t_9 ——反射 P 波传播到后侧边界面各点的时间延迟。

由式(1)一式(10)求解三维平面 SV 波各人工边界面上的速度场和应力场,采用 Matlab 软件批量计算自由场的等效地震节点荷载时程;之后,以数组文件的形式批量载入到大型有限差分软件 Flac3D 中,基于 Fish 编制程序语言,将等效地震节点荷载时程批量施加到三维黏性人工边界的各个节点上,完成斜入射 SV 波的实现。

为验证三维模型中 SV 波斜入射的实现,本研究建立尺寸为 $40\text{ m} \times 40\text{ m} \times 40\text{ m}$ 的立方体局部场地模型,取网格尺寸为 1 m 、介质的弹性模量为 24

MPa,泊松比为 0.2 、质量密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 。从该场地模型左下角以 30° 斜入射输入频率为 4 Hz 、持续时间为 0.25 s 的脉冲波。图 2 为地表监测点(坐标为 $(20\text{ m}, 20\text{ m}, 40\text{ m})$)处的速度时程曲线,理论速度时程曲线由单位脉冲荷载曲线按理论速度峰值调幅获得^[14]。由图 2 可以看到,数值解与波动理论解吻合。

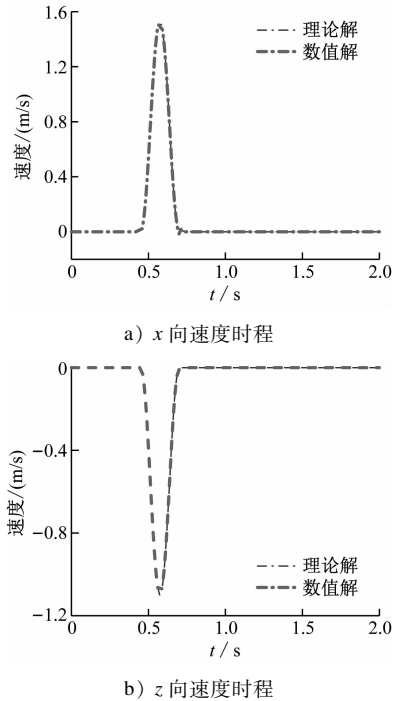


图2 地表监测点速度时程数值解与理论解对比

Fig. 2 Comparison of the numerical and theoretical solutions for the velocity history at the monitoring point of ground surface

2 SV 波斜入射下的动力时程分析

2.1 地层-车站结构动力相互作用模型

本文建立地层-车站结构相互作用三维模型(如图 3 所示),基于已建立的 SV 波斜入射实现方法,进行土与结构地震动力反应分析。模型计算参数见表 1。

十字形换乘车站 x 向与 y 向的结构尺寸分别为 170 m 、 210 m ,车站高度为 15 m 。车站周边土体 x 向、 y 向及 z 向的几何尺寸分别为 190 m 、 230 m 与 30 m 。车站结构模型的板、墙采用壳单元,中柱采用梁单元,土体采用实体单元。单元的尺寸按不大于地震波长的 $1/10$ 来确定。板、墙的单元尺寸为 2.5 m ,中柱和土体的单元尺寸为 1.5 m 。输入 SV

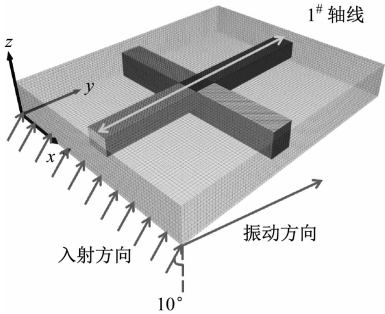


图3 地层-车站结构相互作用模型

Fig.3 Strata-station structure interaction model

波为频率 2 Hz、持续时长 5 s 的正弦波(10 倍的体系周期)。地震波入射方向分别为垂直入射($\alpha = 0^\circ$)、 10° 斜入射($\alpha = 10^\circ$)与 20° 斜入射($\alpha = 20^\circ$),斜入射工况示意图见图 4。主要观测部分为纵轴(2# 轴线)与 x 轴平行的 2 层车站结构;在交叉界面和距离交叉界面 30 m 处,设置 1#、2# 两个观测断面,如图 5 所示。

表 1 模型计算参数

Tab.1 Model calculation parameters

对象	体积质量/(kg/m^3)	弹性模量/MPa	泊松比
土体	1 852	338	0.3
板、墙	2 500	31 500	0.2
柱	2 500	33 500	0.2

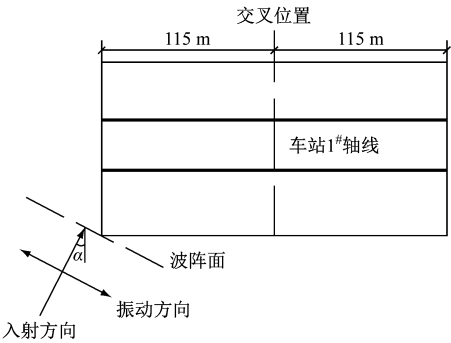


图4 斜入射工况示意图

Fig.4 Schematic diagram of oblique incidence conditions

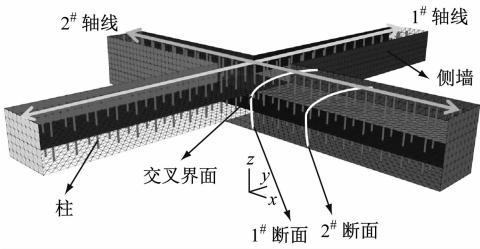


图5 车站结构及监测点的布置

Fig.5 Station structure and layout of monitoring points

2.2 地层-车站结构模型的速度场

图 6 为土层速度场云图。由图 6 可以看出:SV 波以倾斜的波阵面进入土体,并向上传播;当 α 为 0° 、 20° 时, y 向速度幅值分别为 1.30 m/s、0.83 m/s, z 向速度幅值分别为 0.14 m/s、0.66 m/s。由此可见,SV 波斜入射会使场地 y 向速度和 z 向速度时程发生明显的改变。

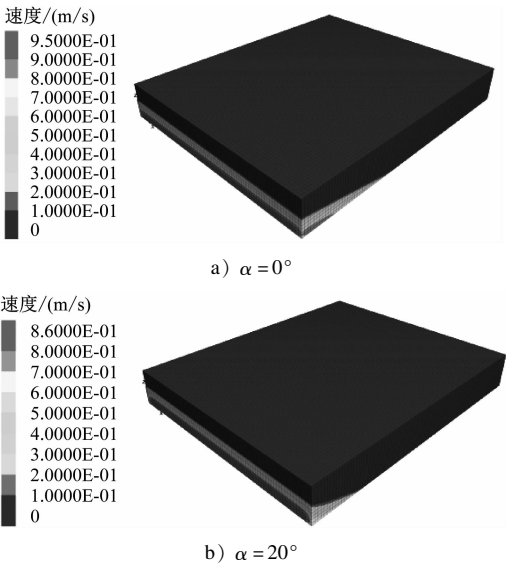


图6 地层-车站结构模型速度场云图

Fig.6 Velocity field nephogram of stratum-station structure model

2.3 车站结构变形

图 7 为最大加速度时的车站三维结构总位移云图。由图 7 a) 可以看出,车站结构主要发生水平 y 向剪切变形。如图 7 b) 所示,当地震动斜入射时,

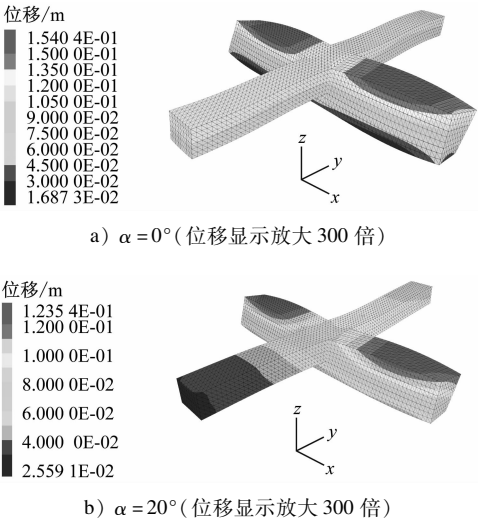


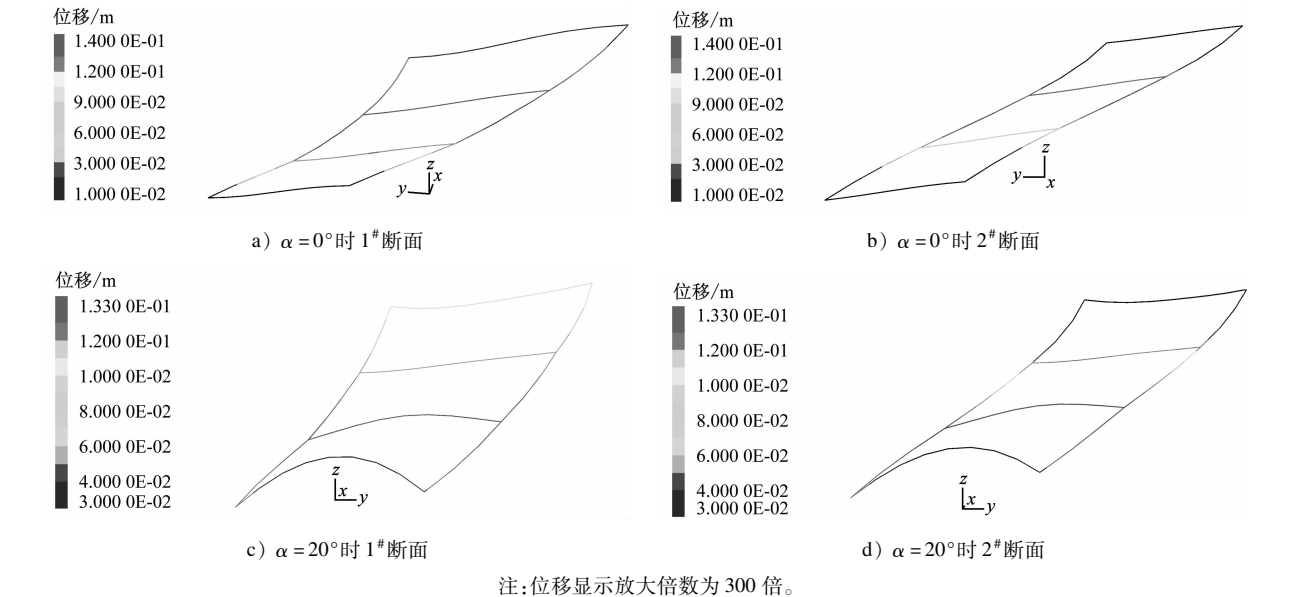
图7 三维结构总位移云图

Fig.7 Total displacement nephogram of the 3D structure

由于行波效应的影响,沿着 y 轴不同位置处会出现不同的位移响应。整个车站结构的水平 y 向剪切变形有所减小。

图 8 为最大加速度时不同入射角下的横断面水平位移云图。由图 8 可知:距离交叉边界 30 m 处断

面的剪切变形大于交叉界面所在断面的剪切变形;斜入射时, z 向变形明显,主观测结构横断面表现出 y 向和 z 向的剪切变形叠加特点,迎波面的 z 向变形明显大于对侧(结构顶部)的 z 向变形。



注:位移显示放大倍数为 300 倍。

图 8 不同 α 下的主结构横断面水平位移云图

Fig. 8 Horizontal displacement nephogram of the lateral section of the main structure at different α

定义 y 向位移角为断面顶底部相对位移与断面高度的比值, z 向位移角为断面左右角部相对位移与断面宽度的比值。则 α 不同时各断面的位移角如表 2 所示。由表 2 可知,与 $\alpha = 0^\circ$ 时相比,SV 波斜入射时的 z 向剪切变形形成的位移角明显大很多,说明车站交叉区域与非交叉区域的剪切变形差异大于垂直入射。由此可知,SV 波斜入射可能会导致交叉边界附近更大的内力突变。

表 2 不同 α 下的各断面位移角

Tab. 2 Displacement angle of each section at different α			
α	断面	y 向位移角	z 向位移角
0°	1#断面	0.003 220 0	0.000 001 2
	2#断面	0.005 610 0	0.000 001 4
20°	1#断面	0.001 310 0	0.000 310 0
	2#断面	0.002 420 0	0.000 430 0

图 9 a) 为 $\alpha = 20^\circ$ 时 2#轴线各层板 y 向位移峰值。由图 9 a) 可见:交叉区域 y 向位移幅值较小,且变化不大;在非交叉部分, y 向位移幅值明显增大。经分析,这主要由交叉区域刚度加强所致。顶板的交叉区域与非交叉区域位移相差值最大,底板最小。图 9 b) 所示为不同入射角度地震动下车站结

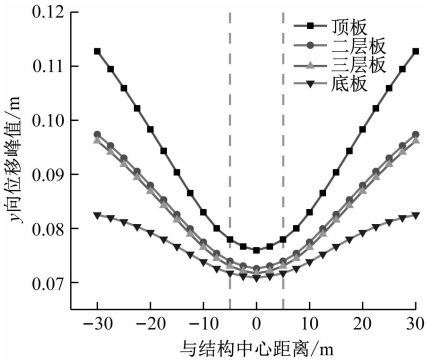
构顶板 2#轴线 y 向位移,随着入射角度的增大,结构反应中的水平 y 向位移逐渐减小。入射角较大时,交叉区域与非交叉区域的位移相差值较大。

2.4 柱顶底相对位移

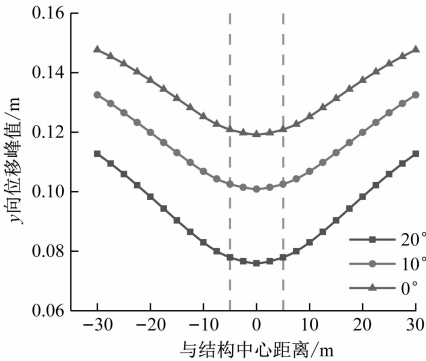
图 10 为车站结构柱顶底相对位移峰值沿 2#轴线的分布曲线。由图 10 可见,随着 α 的增大,车站结构 y 向柱顶底相对位移减小。这是由于波场分解,使得 y 向位移分量随着 α 的变大而变小。此外,与第一层相比,第三层柱顶底相对位移明显更大,且交叉区域相对位移最小,从交叉边界到远离交叉区域处的柱顶底相对位移不断增大。

2.5 内力响应

交叉车站板及侧墙弯矩峰值沿 2#轴线的分布曲线如图 11 所示。由图 11 a) 可见,顶板和底板交叉界面发生了弯矩值突变,而中间两层板交叉界面弯矩变化不大,且峰值明显更小,故需重点关注顶板和底板的交叉界面受力情况。由图 11 b) 可见,随着入射角度的增大,弯矩峰值明显增大。由图 11 c) 可知: $\alpha = 20^\circ$ 时,弯矩峰值出现在侧墙中部;越远离交叉部分,弯矩值越小。综上可知,三层交叉车站顶板、底板和侧墙组成的外侧结构具有更



a) $\alpha = 20^\circ$ 下各层板 y 向位移



b) 不同 α 下顶板 y 向位移

图 9 板 y 向位移峰值沿 2# 轴线的分布曲线

Fig. 9 Distribution curve of the peak y-directional displacement of the plate along the 2[#] axis

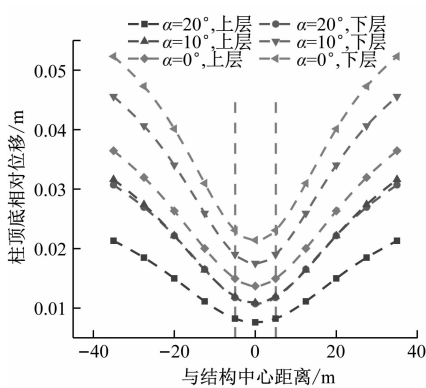
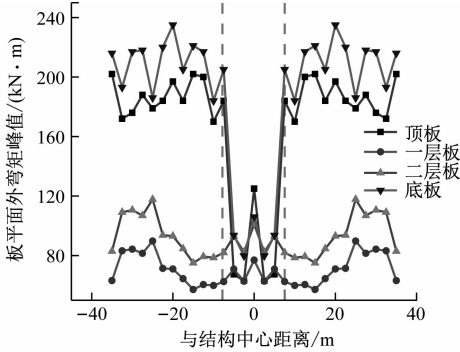


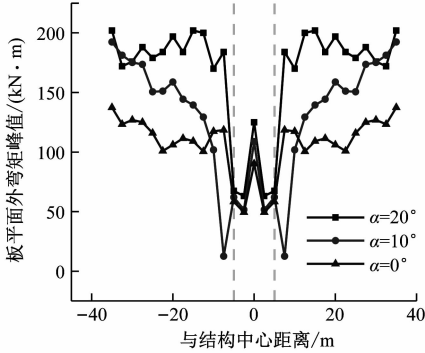
图 10 不同 α 下柱顶底相对位移沿 2# 轴线的分布曲线
Fig. 10 Distribution curve of the relative displacement of the column top and bottom along the 2[#] axis line for different α

大的刚度,承受了更大的内力,需要重点关注 SV 波斜入射时交叉界面的内力突变。

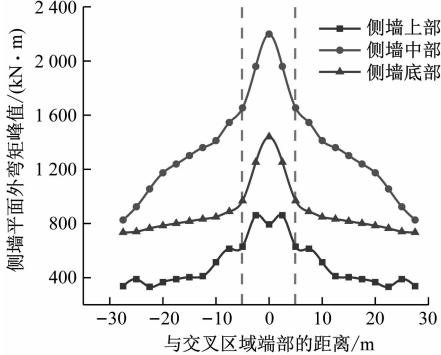
图 12 为 2# 轴线柱顶轴力峰值的变化。可以看出:交叉区域的柱顶轴力最大;随着 α 的增大,柱顶轴力显著增大; α 每增大 10° ,轴力约相应增大一倍,且从交叉界面开始柱顶轴力明显降低。以 $\alpha = 20^\circ$



a) $\alpha = 20^\circ$ 下各层板弯矩峰值



b) 不同 α 下的顶板弯矩峰值



c) $\alpha = 20^\circ$ 时侧墙不同高度处峰值弯矩

图 11 板、侧墙弯矩峰值沿 2# 轴线的分布曲线

Fig. 11 Distribution curve of peak bending moment of slab and side wall along 2[#] axis

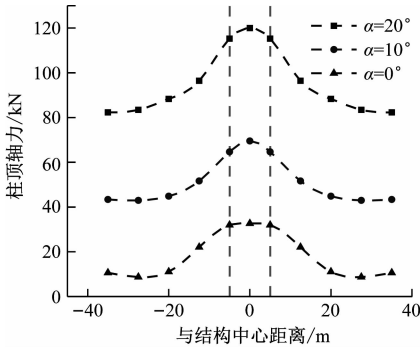


图 12 不同 α 下柱顶轴力峰值沿 2# 轴线的分布曲线
Fig. 12 Distribution curve of the peak axial force at column top along 2[#] axis for different α

为例,在交叉区域端部,柱顶轴力从 115.2 kN 降至 96.4 kN,降低了 16.33%,需要重点关注该区域左右两侧中柱所受轴力的不均匀性。

3 结语

本文针对不同入射 SV 波的入射角度下十字形地铁换乘车站的动力响应特性进行了分析,在数值模型中采用黏性人工边界加等效节点力输入来等效半无限地基中的波辐射效应。得到的主要结论为:

1) 与垂直入射相比,SV 波斜入射会使得结构速度时程发生显著改变, α 越大,竖向速度响应增幅越大。

2) 地震动作用下,十字形地铁换乘车站交叉区域的变形小于非交叉区域。顶板、底板、侧墙的内力在交叉边界处突变。故需重点关注交叉边界内力的突变。

3) SV 波斜入射时,十字形地铁换乘车站会同时发生水平剪切变形与竖向剪切变形。SV 波斜入射时,交叉区域的柱顶轴力显著大于非交叉区域。顶板的弯矩随着入射角的增大而增大。因此,在进行抗震分析时,有必要考虑地震波入射角对于车站交叉部位变形和内力的影响。

参考文献

- [1] 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(2): 223.
DU Xiuli, LI Yang, XU Chengshun, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018(2): 223.
- [2] LYSMER J, KUHLEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1969, 95(4): 859.
- [3] DEEKS A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(1): 25.
- [4] LIAO Z P, WONG H L. A transmitting boundary for the numerical simulation of elastic wave propagation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1984, 3(4): 174.
- [5] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
DU Xiuli. Theories and methods of wave motion for engineering [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [6] 张梁. 地震波斜入射下地铁双隧道与地铁车站的动力响应研

究[D]. 天津: 天津大学, 2019.

ZHANG Liang. Study on the dynamic response of subway tunnel and subway station under oblique incidence of seismic wave[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.

- [7] 路德春, 李云, 马超, 等. 斜入射地震作用下地铁车站结构抗震性能分析[J]. 北京工业大学学报, 2016(1): 87.
LU Dechun, LI Yun, MA Chao, et al. Analysis of the three-dimensional seismic performance of underground[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016(1): 87.
- [8] 谭灿星. SV 波任意角度斜入射下地铁车站地震响应分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
TAN Canxing. Seismic response analysis of subway station under oblique incidence of SV wave at any angle[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.
- [9] 黄景琦, 杜修力, 田志敏, 等. 斜入射 SV 波对地铁车站地震响应的影响[J]. 工程力学, 2014(9): 81.
HUANG Jingqi, DU Xiuli, TIAN Zhimin, et al. Effect of the oblique incidence of seismic SV waves on the seismic response of subway station structure[J]. Engineering Mechanics, 2014(9): 81.
- [10] WU W, GE S, YUAN Y, et al. Seismic response of subway station in soft soil: shaking table testing versus numerical analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 100: 103389.
- [11] 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(7): 1227.
WANG Guobo, YU Miaokun, YUAN Mingzhi, et al. Seismic response analysis of cross metro transfer station structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019(7): 1227.
- [12] 于仲洋, 张鸿儒. 交叉换乘地铁车站地震特性及其设计方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019(5): 1011.
YU Zhongyang, ZHANG Hongru. Seismic characteristics and design method for cross transfer subway stations[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019(5): 1011.
- [13] 章小龙, 李小军, 陈国兴, 等. 黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J]. 力学学报, 2016(5): 1126.
ZHANG Xiaolong, LI Xiaojun, CHEN Guoxing, et al. An improved method of the calculation of equivalent nodal forces in viscous-elastic artificial boundary[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016(5): 1126.
- [14] 王飞, 宋志强, 刘云贺, 等. SV 波斜入射不同自由场构建方法下水电站地面厂房地震响应研究[J]. 振动与冲击, 2021(7): 9.
WANG Fei, SONG Zhiqiang, LIU Yunhe, et al. Seismic response of ground powerhouse of hydropower station based on different free field construction methods with oblique incidence of SV wave[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021(7): 9.

(收稿日期: 2021-12-21)