

引用格式: 潘婷婷, 胡雪平, 任天翔, 等, 2022. 纵横波时差耦合作用下地铁车站地震响应分析 [J]. 地质力学学报, 28 (4): 596-604. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022028

Citation: PAN T T, HU X P, REN T X, et al., 2022. Seismic response analysis of the subway station structure under the coupling action of P and S seismic waves with the time difference [J]. Journal of Geomechanics, 28 (4): 596-604. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022028

## 纵横波时差耦合作用下地铁车站地震响应分析

潘婷婷<sup>1</sup>, 胡雪平<sup>2</sup>, 任天翔<sup>3</sup>, 徐博<sup>3</sup>

PAN Tingting<sup>1</sup>, HU Xueping<sup>2</sup>, REN Tianxiang<sup>3</sup>, XU Bo<sup>3</sup>

1. 郑州工业应用技术学院建筑工程学院, 河南 新郑 451100;

2. 山东省地质调查院, 山东 济南 250014;

3. 中国地质科学院, 北京 100037

1. School of Architectural Engineering, Zhengzhou University of Industrial Technology, Xinzheng 451100, Henan, China;

2. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250014, Shandong, China;

3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

### Seismic response analysis of the subway station structure under the coupling action of P and S seismic waves with the time difference

**Abstract:** Ground motion records of Beijing from the Tangshan earthquake was selected as the seismic input, and then the seismic simulation of a three-layer and three-span subway station with a rectangle cross-section in Beijing was carried out using the finite difference procedure. The variation law of dynamic acceleration, displacement amplification effect and dynamic stress of the subway station structure under the coupling action of P and S seismic waves with time difference was discussed. It is shown that, the process of impact on dynamic response and stress of the typical subway structure could be clear, which is, firstly, the P wave makes the station structure gain the largest vertical acceleration, and then, the structure gains the largest horizontal acceleration and stress through the coupling action of P and S seismic waves with the time difference, and finally, as the seismic force gradually reduces to disappear, the structure restore stability. The amplification effect of parameters in the dynamic response of the structure showed that the amplification coefficient of the side wall and column structures increases gradually from bottom to top and the amplification coefficient of the vertical acceleration is much larger than that of the horizontal acceleration. As the P wave can cause a large vertical acceleration and strong amplification effect, particular emphasis should be placed on the vertical anti-seismic performance of underground structures near the source. The structure gains the largest horizontal acceleration and tension stress under the coupling action of P and S seismic waves with the time difference, which is the key factor in structure destruction.

**Keywords:** underground structure; P and S seismic waves; numerical simulation; coupling action with time difference; seismic response

**摘要:** 以北京实测地震波作为输入, 运用二维显示有限差分程序对北京地区常见的 3 层 3 跨矩形断面结构地铁车站进行了动力模拟分析, 探讨了纵横波时差耦合作用下车站结构加速度、位移放大效应及动应力变化规律。计算结果表明地震纵横波时差耦合作用导致浅埋地铁车站结构受力变形过程为: 首先纵波作用使得结构产生较大的竖向加速度, 导致结构产生一定的正应力; 继而纵横波时差耦合作用使得结构产生较大的水平加速度, 此时结构内力达到最大, 容易使得结构产生较大的拉应力; 最终随着地震动力

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20211314)

This research is financially supported by the China Geological Survey (Grant DD20211314)

第一作者简介: 潘婷婷 (1989—), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向混凝土结构和岩土工程。E-mail: 760218087@qq.com

通讯作者: 胡雪平 (1980—), 男, 高级工程师, 学士, 主要研究方向地球物理勘查与应用。E-mail: huxueping\_430@126.com

收稿日期: 2022-03-06; 修回日期: 2022-05-27; 责任编辑: 吴芳

作用逐渐减小至消失,结构内力减小,恢复稳定。在地震动力作用下,地铁车站侧墙、中柱等结构的加速度自下而上均发生放大效应,且竖向加速度的放大程度远高于水平加速度。因地震纵波产生较大的竖向加速度,并且具有较强的放大效应,需重视距离震源较近地区的地下结构竖向抗震性能;而纵横波时差耦合作用下,结构的内力往往能达到最大值,是地下结构发生破坏的主控因素。

**关键词:** 地下结构; P-S地震波; 数值仿真; 时差耦合作用; 地震响应

**中图分类号:** P642.22; P694 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616(2022)04-0596-09

**DOI:** 10.12090/j.issn.1006-6616.2022028

## 0 引言

地下结构动力响应特征及抗震性能研究一直受到研究人员广泛关切,加之最近几年城市地下结构建设中涌现了大量穿越、密贴、连接、一体建造及异形大跨等复杂型式(陶连金等,2019;于仲洋等,2019;陈之毅等,2020;韩学川等,2020;张文彬等,2021),一旦发生地震破坏,修复相当困难且昂贵。岩土介质包裹的地铁地下结构并不能因为受周围具有良好吸波介质约束而轻视其抗震性能研究(许成顺等,2017)。地铁地下结构在强震时严重破坏现象也屡有发生(庄海洋,2017;刘蕾等,2018)。例如,日本1995年的神户地铁车站结构在 $M_s$ 7.2阪神地震中破损非常严重(杜修力等,2016),尤以大开车站堪称为“教科书型”案例,“直下型地震”是主要诱因,其特征是竖向地震力比重较大,在水平和竖向地震力共同作用下,大开地铁车站结构中柱压溃倾倒,地表塌陷最大接近2.5 m(杜修力等,2016,2017,2018;陈文斌等,2021)。研究表明,中柱是地下结构最易受到地震破坏的构件。国胜兵等(2002)则认为水平和竖向地震动共同作用时,中柱底端压力大于上端,从而中柱上端易发生应力反转,由较小的压应力突变为较大拉应力,同时在水平剪切作用下,亦可能发生拉剪破坏。庄海洋等(2008)分析了大开车站结构的破坏全过程,认为顶板破坏后,中柱将独自完全承担上覆土压力,易在冲剪和压力作用下屈曲破坏。李洋等(2020)认为大开车站高轴压比的中柱易在遭受到较大侧向变形时产生破坏。但是,上述相关研究工作主要围绕竖向和水平向地震对结构本身内力的影响,而实际上,地铁地下结构受到的水平和竖向地震加速度可由地震纵波产生,亦可由横波产生,这两种波型传播时存在速度差,进而会有时间差,两

者时差耦合作用对地铁地下结构抗震性能影响可能更有研究意义,但这方面的研究鲜有报道。

崔芳鹏等(2009)模拟分析了地震纵横波存在时差耦合作用下汶川震区典型滑坡地震失稳全过程,认为地震纵波使得地震滑坡产生初始拉裂,纵横波的时差耦合作用则导致了滑坡具有“抛掷”效应。目前,地下结构动力响应方面关于地震波的研究多偏于不同入射角、不同种类地震波对比(汪精河等,2017;张奎等,2019;谷坤生等,2020;陈曦等,2021),地震纵横波时差耦合作用的影响尚未报道。文章将以北京地铁16号线某车站明挖段3层3跨箱型框架结构为研究对象,利用北京地区实测唐山大地震的地震动记录(杨雅琼等,2016),研究典型地铁车站在地震纵横波耦合输入下的动力响应,该研究将有助于从地震纵横波时差分析角度去重新认识典型地铁车站地震响应机理。

## 1 地震纵横波时差耦合作用

纵横波(P波、S波)作为最具破坏性的两类地震波一直倍受关注和研究,P波的质点振动方向同轴于波行进方向,S波的质点振动方向则垂直于波行进方向,分别表现出对岩土体的拉压和剪切作用(李杰等,1992),这两种波都会产生水平及竖向加速度。震中附近的地震波几乎垂直于地表,故竖向加速度几乎全由P波产生,而水平向加速度也几乎全由S波产生(熊良宵等,2007);随着距震中距离的增加,地震波入射角度逐渐向水平偏转,此时竖向、水平加速度各自都是由相当比重的P波、S波产生的,P波、S波的作用不应分别考虑。同时,由于P波、S波在同一岩土介质中传播时速度具有差异性,使得同源的P波、S波在抵达同一地铁车站时存在时间差,即地铁车站结构先受到P波的单独拉压作用(陈文化等,2019),

当 S 波到达后, 进而受到 P 波的拉压和 S 波的剪切耦合作用 (图 1), 其中  $\alpha$  为入射角, 是地震波射线和界面法线方向的夹角。而这两种波传播时间

差  $\Delta t$  与震源距关系详见公式 1。

$$\Delta t = D \cdot (1/V_s - 1/V_p) \quad (1)$$

其中:  $D$  为震源距,  $V_s$ 、 $V_p$  分别为 P 波、S 波波速。

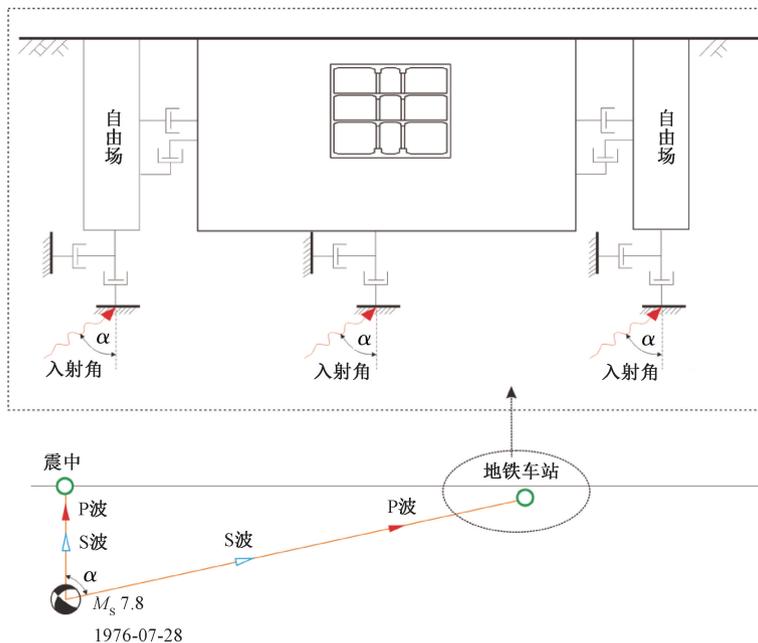


图 1 纵横波作用下模型边界条件示意图

Fig. 1 Diagram showing the boundary conditions of the model with P and S seismic waves

## 2 弹塑性动力时程分析

### 2.1 模型建立

北京市地铁 16 号线某车站沿西三环南路建造, 设计采用暗挖+明挖综合方案, 设计总长度为 279.60 m。车站明挖标准段为地下 3 层 3 跨箱型框架结构, 宽度 24.10 m, 柱直径 0.70 m, 纵向间距 9.12 m, 顶板覆土约为 2.50 m, 底板平均埋深 21.44 m, 模型图详见图 2; 采用 FLAC<sup>2D</sup> (Fast Lagrange Analysis of Continua) 二维有限差分程序进行建模, 模型两侧边界均超过 1 倍的结构长度, 总长度为 100 m, 模型底部边界超过结构底部 1 倍埋深, 深度为 50 m。结合勘察报告与数值计算模型相关方法, 合并物理力学类似地层为 6 层土体 (表 1)。

分别用于获得车站梁、板、柱结构各关键点的加速度及位移时程曲线通过图 2 中红色实心点进行监测; 车站、地层结构均采用实体网格单位模拟, 其中, 车站附近网格由于计算需要进行加密, 相关参数可见表 2。

### 2.2 模型动力参数

选择  $M_s$  7.8 唐山地震 (北纬 39.6°, 东经 118.2°, 震源深度 12 km) 发生时北京旅馆水平、竖向地震

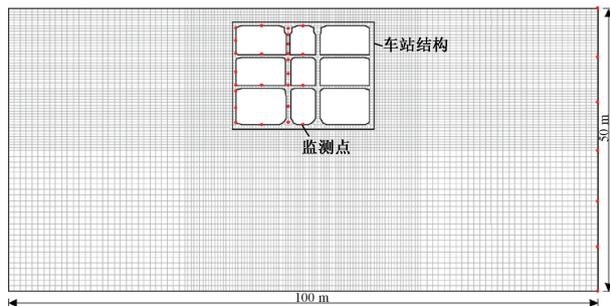


图 2 FLAC<sup>2D</sup> 计算模型及监测点

Fig. 2 FLAC<sup>2D</sup> computational model and monitoring points

表 1 土层参数

Table 1 Soil parameters

名称	厚度/ m	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	剪切波速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
杂填土	3.0	1.81	200	0.30	10.00	10
圆砾卵石	4.0	2.10	363	0.31	20.00	23
卵石	7.0	1.93	405	0.30	0.00	35
卵石	9.0	2.10	523	0.30	0.00	40
卵石	8.0	2.13	623	0.30	0.00	42
卵石	19.0	2.16	666	0.30	0.00	42

记录作为底部地震动输入, 加速度时程曲线详见图 3。因北京市地铁 16 号线某车站距离震中唐山约  $D = 156$  km, 震源深度  $H = 12$  km, 则地震 P 波、

表 2 结构参数

Table 2 Structural parameters

部位	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性 模量/GPa	几何尺寸/ m
柱	25.0	34.5	直径: 0.7
梁、板	24.0	33.5	上中下长度: 9.55、2、9.55 单位宽度: 1.0 厚度: 0.4
车站结构 框架	25.0	30.0	长度: 24.1 单位宽度: 1.0 厚度: 0.7

S 波抵达某车站的时间差  $\Delta t$  根据公式 (1) 计算得出为 16.71 s ( $\Delta t = D/V_s - D/V_p = 156/4 - 156/7 = 16.71 \text{ s}$ ); 同时, 地震波在模型底部斜入射角为  $\text{actan}(D/H) = \text{actan}(156/12) = 85.6^\circ$ 。因此, P 波对地铁车站结构的单独拉压作用产生两个方向加速度 (水平+竖向); S 波到达地铁车站时, 同样产生两个方向加速度 (水平+竖向)。所以数值计算时, 在输入 P 波产生的水平、竖向加速度约 16.71 s 后, 继续输入 S 波产生的对应双向加速度 (图 1), 此时的加速度已经是 P、S 波分别产生的双向速度的累加 (图 3), 据此分析地铁车站结构在单独及耦合地震条件时的响应。

模拟软件采用 FLAC<sup>2D</sup> (陶连金等, 2017; 许有俊等, 2017; 杨益飞等, 2017), 在初始静力计算平衡后, 模型再继续进行动力模拟计算, 动力模拟是在模型底部输入地震动, 侧边采用 Free-field 自由场边界, 详见图 1 (刘立波等, 2017; 赵金等, 2019; 张迎宾等, 2021)。阻尼采用瑞利阻尼, 选

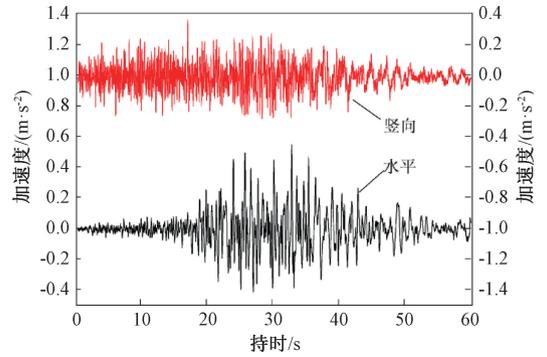


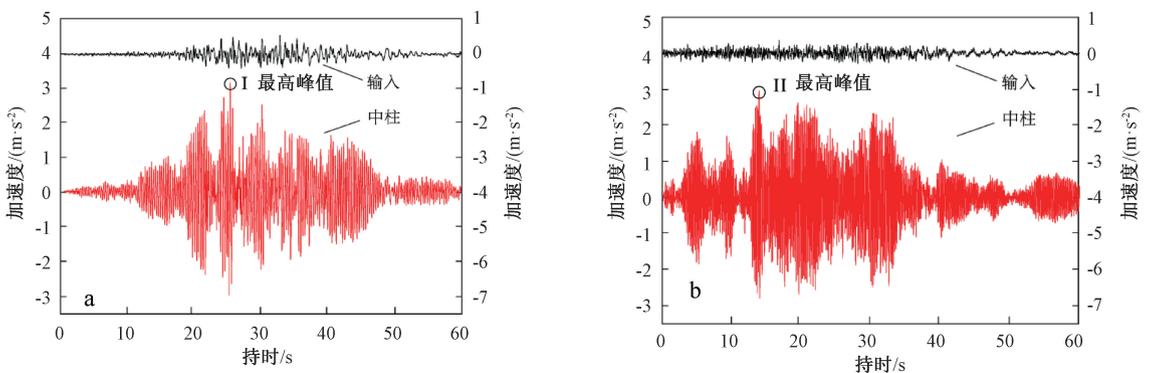
图 3 输入数值模型的水平、竖向加速度时程曲线  
Fig. 3 Time-history curves of the horizontal and vertical accelerations inputted in the numerical model

用岩土材料最小阻尼比 0.005。

### 3 弹塑性动力时程分析

#### 3.1 车站结构加速度、位移响应

从图 4 可看出, 中柱顶端加速度峰值 (水平向) 在 I 点达到最高 (即地震持时约 25.1 s 处), 绝对值大约 0.32 g, 相应部位放大倍数约 5.73。中柱顶端加速度峰值 (竖向) 在 II 点达到最高 (即地震持时约 16.2 s 处), 绝对值大约 0.29 g, 加速度放大倍数达到 8.01。可以发现, 中柱顶端加速度峰值 (水平向) 出现在  $\Delta t = 16.71 \text{ s}$  之后, 即 S 波到达后, 由 P 波、S 波耦合作用所致, 而加速度峰值 (竖向) 则发生在  $\Delta t = 16.71 \text{ s}$  之前, 说明加速度峰值 (竖向) 主要由 P 波单独作用所致。



a—水平加速度; b—竖向加速度

图 4 模型监测点 (底部输入、中柱顶部) 加速度时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of the acceleration at the monitoring points in the numerical model

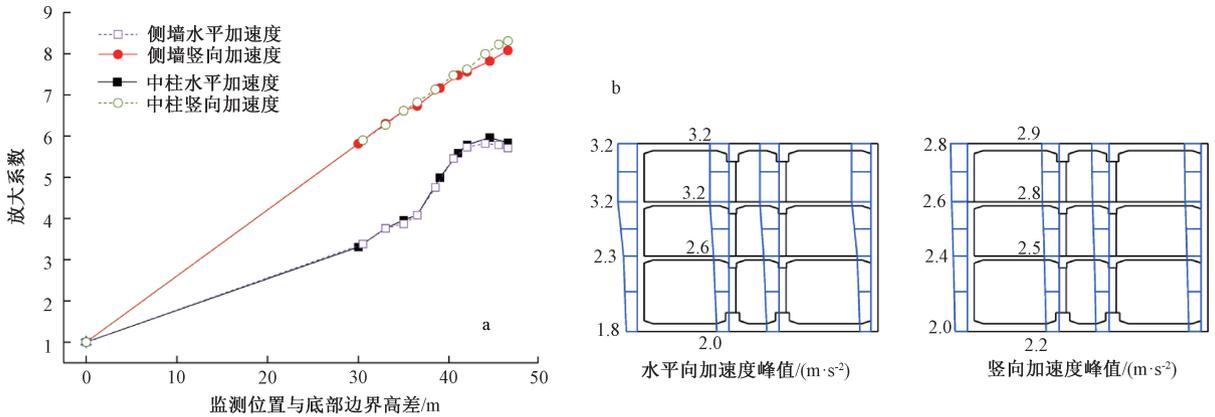
(a) Horizontal acceleration; (b) Vertical acceleration

由图 5 可看出, 在地震动动力作用下, 地铁车站侧墙、中柱等结构的加速度自下而上均发生放大

效应, 虽然竖向的加速度峰值小于水平向对应值, 但竖向加速度的放大程度远高于水平加速度, 甚

至在侧墙、中柱与水平顶板节点处达到 8.0 以上。此外，中柱的两个方向的加速度均基本大于侧墙，尤其是底部位置，这可能是由于中柱周边未有岩土介质约束所致。需指出的是，由于侧墙、中柱

与水平顶板节点刚度较大，在节点处的水平加速度放大值会略微降低，但节点的刚度对竖向加速度放大值影响较小，放大系数与相对底部边界高差近似呈直线关系。



a—加速度放大系数随高差变化规律曲线；b—结构上加速度峰值分布规律包络图

图 5 结构动力加速度峰值及放大系数

Fig. 5 Amplification coefficient and peak value of the structural dynamic acceleration

(a) Curves of acceleration amplification coefficient with a height difference; (b) Envelope diagram of the structural acceleration peaks

### 3.2 结构的动应力特征

由图 6 可以看出，由地震纵横波时差耦合作用引起的结构内力明显大于由横波引起的对应值，需要指出的是在动力反应持时 30 s 时，纵横波时差耦合作用使得结构中柱、侧墙产生拉应力峰值，以中柱顶端尤甚，需注意的是，此时中柱左右两侧各自产生拉压应力峰值，使得中柱弯曲达到最大，即中柱顶端易发生弯曲变形。动力反应持时 40 s 之后，结构地震应力幅值又恢复到较小的水平。可见地震波对浅埋地铁车站结构内力的影响过程可总结为：首先纵波作用使得结构产生较大的竖向加速度；继而纵横波时差耦合作用使得结构产生较大的水平加速度，此时结构内力达到最大；最终随着地震动力作用逐渐减小至消失，结构内力逐渐恢复初值。

### 3.3 结果分析

通过地铁车站结构加速度、位移动力响应特征分析可知，中柱、侧墙结构顶端加速度峰值（竖向）在地震持时约 16.2 s 处达到峰值（即仅 P 波到达时， $\Delta t < 16.71$  s），峰值为 0.29 g，加速度放大倍数达到 8.01。而加速度峰值（水平向）在地震持时约 25.1 s 处的绝对值大约为 0.32 g（即 S 波到达时， $\Delta t > 16.71$  s），相应部位加速度放大倍数约 5.73。

结构的动应力特征表明在 S 波到达后，纵横波

时差耦合作用使得结构中柱、侧墙产生拉应力峰值，以中柱顶端最为显著，最大能达到约 1.27 MPa，而在静力条件下，最大拉应力仅有 0.27 MPa。

## 4 结论与建议

文章以北京市地铁 16 号线某车站明挖段 3 层 3 跨箱型框架结构为研究对象建立了计算模型，运用二维有限差分程序进行动力时程模拟，研究了地震纵横波时差耦合作用对典型地铁车站结构动力响应的影响，可得出以下结论。

(1) 地震纵横波时差耦合作用影响浅埋地铁车站结构动力响应及受力的过程为：首先纵波作用使得结构产生较大的竖向加速度；继而纵横波时差耦合作用使得结构产生较大的水平加速度，此时结构内力达到最大；最终随着地震动力作用逐渐减小至消失，结构内力逐渐恢复初值。

(2) 在地震动力作用下，地铁车站侧墙、中柱等结构的加速度自下而上均发生放大效应，且竖向加速度的放大程度远高于水平加速度，甚至在侧墙、中柱与水平顶板节点处达到 8.0 以上。

(3) 地震纵波产生较大的竖向加速度，而同时竖向加速度的放大程度亦较高，需加强对距离震源较近地区的地下结构竖向抗震性能的重视程度；而纵横波时差耦合作用下，结构的内力往往

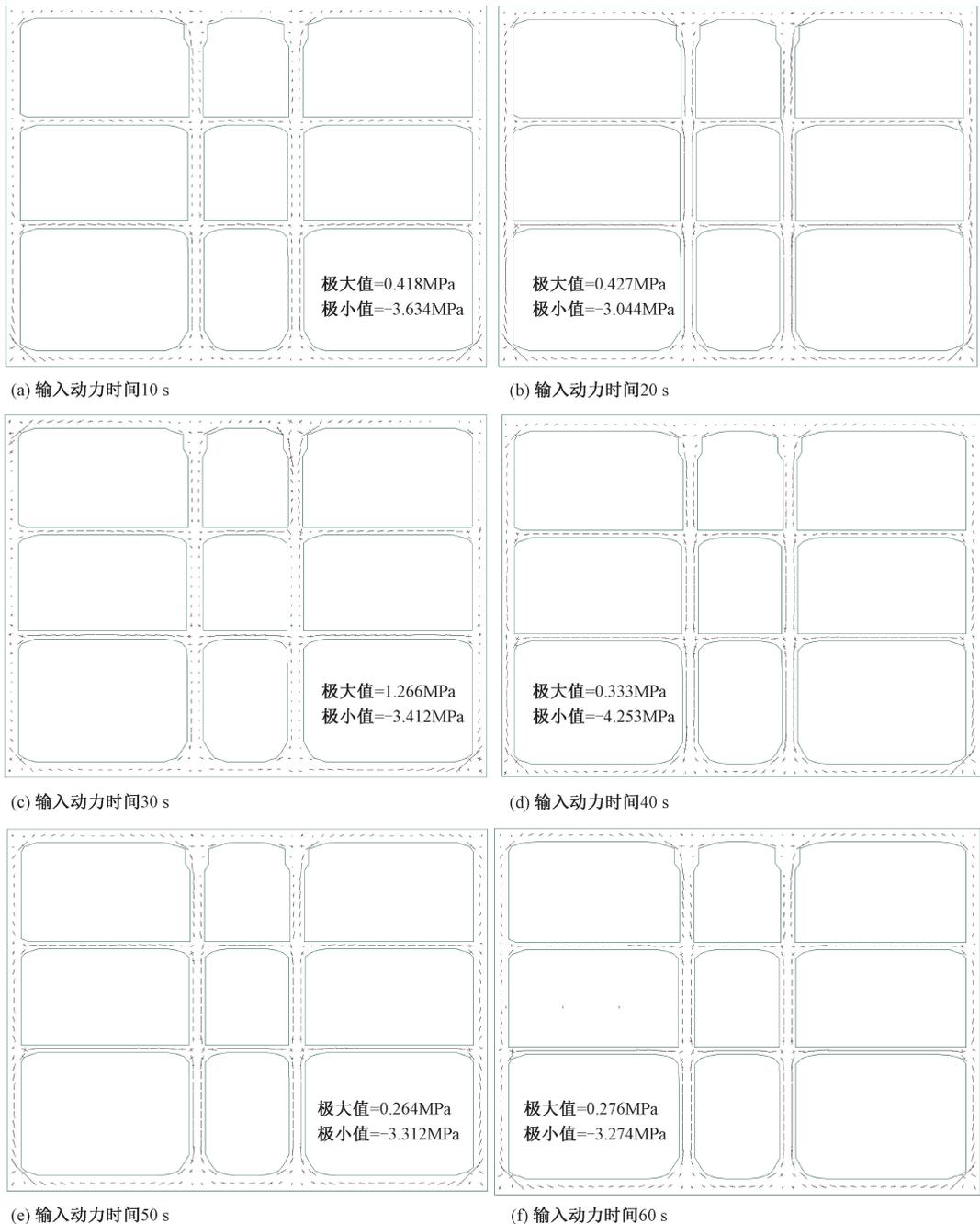


图 6 地铁车站结构各监测点处地震应力峰值

Fig. 6 Seismic stress peak at each monitoring point of the structures of the subway station

能达到最大值, 是地下结构发生破坏的主控因素。因此, 在今后的抗震设计中应充分考虑纵、横波两个过程对于地铁地下结构的顺次和耦合作用, 尤其是在最先抵达的纵波造成损伤的情况下, 纵横波时差耦合作用继续使得结构产生不可恢复的破坏。文章未考虑结构损伤本构模型, 将在今后的研究中进一步深化研究耦合作用下结构动力破坏特征。此外, 较震源深度, 浅埋地下结构与地表距离相对较近, 地震波在地表边界的反射作用

不容忽视。以及地震波传播过程中由于传播介质的非均匀性, 尤其是近地表土体、风化层对于地震波吸收作用的影响也是今后开展地下结构纵横波时差耦合作用效应研究工作的重点考虑方向。

References

CHEN W B, ZHUANG H Y, LI S, et al., 2021. Seismic performance of the three-layer three-span subway underground station structure with seismic isolation bearings fixed on the top of columns [J].

- Technology for Earthquake Disaster Prevention, (1): 146-156. (in Chinese with English abstract)
- CHEN W H, Bao H Y. Influence of tunnel lining-soil interface viscoelasticity on subway vibration propagation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, (202): 3460-3468. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X, CHEN Q J, 2021. Seismic Mitigation Effect Analysis of Subway Station Center Column Subjected to Near-Fault Ground Motions [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 42 (1): 67-79. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Z Y, LIU W B, CHEN W, 2020. Performance experiment of a multi-story subway station [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 48 (6): 811-820. (in Chinese with English abstract)
- CUI F P, 2009. Study on collapsing and sliding response of slope triggered by single and combined action with time difference of P and S seismic waves [D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science. (in Chinese with English abstract)
- DU X L, WANG G, LU D C, 2016. Earthquake damage mechanism analysis of Dakai metro station by Kobe earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 36 (2): 165-171. (in Chinese with English abstract)
- DU X L, MA C, LU D C, et al., 2017. Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Dakai subway station under seismic loads [J]. China Civil Engineering Journal, 50 (1): 53-62, 69. (in Chinese with English abstract)
- DU X L, LI Y, XU C S, et al., 2018. Review on damage causes and disaster mechanism of Dakai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 40 (2): 223-236. (in Chinese with English abstract)
- GAI H L, YAO S H, YANG L P, et al., 2021. Characteristics and causes of coseismic surface rupture triggered by the "5.22" MS 7.4 Earthquake in Maduo, Qinghai, and their significance. Journal of Geomechanics, 27 (6): 899-912. (in Chinese with English abstract)
- GU K S, GUO M Z, TANG X W, et al., 2022. Dynamic response and spectrum characteristics of anti-dip rock slopes under earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 44 (1): 62-71. (in Chinese with English abstract)
- GUO S B, ZHAO Y, ZHAO Y T, et al., 2002. Dynamic analysis of underground structures under vertical horizontal seismic excitations [J]. Underground Space, 22 (4): 314-319. (in Chinese with English abstract)
- HAN X C, TAO L J, LIU C X, et al., 2020. Analysis of influencing factors of seismic response of connected parallel subway stations [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46 (8): 929-939. (in Chinese with English abstract)
- LI J, LI G Q, 1992. Introduction of earthquake engineering [M]. Beijing: Seismological Publishing House. (in Chinese with English abstract)
- LI Y, XU C S, DU X L, 2020. Causal analyses of different degree of earthquake damage occurred on Daikai subway station and its running tunnels during Kobe earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 40 (3): 326-336. (in Chinese with English abstract)
- LIU L, LIU X L, ZHOU J X, 2018. Numerical analysis on dynamic response of the oblique metro tunnel in ground fissure area [J]. Journal of Geomechanics, 24 (2): 238-243. (in Chinese with English abstract)
- LIU L B, LI H B, LIU Y Q, 2017. Ground Motion Amplification Effect of High and Steep Slope [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 34 (9): 98-103. (in Chinese with English abstract)
- MENG Q, GAO K, CHEN Q Z, et al., 2021. Seismogenic, coseismic and postseismic deformation and stress evolution of the 2008 Wenchuan earthquake: Numerical simulation analysis. Journal of Geomechanics, 27 (4): 614-627. (in Chinese with English abstract)
- TAO L J, LIU C X, BIAN J, et al., 2017. Seismic response of subway station with large span and Y shaped column [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 49 (1): 55-64. (in Chinese with English abstract)
- TAO L J, LIU S, HAN X C, et al., 2019. Seismic response analysis of subway stations with above-ground high-rise structures [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 29 (5): 569-574. (in Chinese with English abstract)
- WANG J H, ZHOU X J, LIU J G, et al., 2017. Numerical analysis of the transverse dynamic response of mountain tunnels subjected to an oblique incidence of earthquake waves [J]. Modern Tunnelling Technology, 54 (3): 90-97. (in Chinese with English abstract)
- XIONG L X, LI T B, LIU Y, 2007. Numerical simulation of seismic response at the entrance of the unsymmetrical loading tunnel [J]. Journal of Geomechanics, 13 (3): 255-260. (in Chinese with English abstract)
- XU C S, XU Z G, DU X L, et al., 2017. Comparative study of simplified methods for seismic analysis of underground structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 37 (2): 65-80. (in Chinese with English abstract)
- XU Y J, LIANG W Z, LIU X M, et al., 2017. Soil Mass Stability at the Working Face of a Rectangular Pipe-Jacking Tunnel with a Large

- Section [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 54 (5): 70-77, 85. (in Chinese with English abstract)
- YANG Y Q, WANG X S, WANG Y G, et al., 2016. Seismogenic fault segmentation of Tangshan earthquake sequence derived from focal mechanism solutions [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 38 (4): 632-643. (in Chinese with English abstract)
- YANG Y F, GUAN Q, SUN R H, et al., 2017. Numerical simulation analysis of deep foundation pit deformation by top-down construction method based on FLAC-3D [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 40 (4): 522-527. (in Chinese with English abstract)
- YU Z Y, ZHANG H Z, QIU Y, et al., 2021. Shaking table tests for cross subway station structure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40 (9): 142-151. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG K, LI W H, ZHAO C G, 2020. Application of equivalent linear method in underwater site analysis under oblique incidence of seismic waves [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 39 (22): 41-49. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG W B, ZHOU H Z, ZHENG G, et al., 2021. Seismic response analysis of connection between metro station and tunnel [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2: 438-444. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y B, LIU J, TANG Y B, et al., 2021. Dynamic Response Analysis of Seismic Slopes Considering Topographic Effect [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 43 (1): 142-153. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO J, WU H G, YANG T, 2019. Research on dynamic response of highway bridge unstable slope treatment project based on FLAC3D [J]. *World Earthquake Engineering*, 35 (3): 177-185. (in Chinese with English abstract)
- ZHUANG H Y, CHENG S G, CHEN G X, 2008. Numerical simulation and analysis of earthquake dam ages of Dakai metro station caused by Kobe earthquake [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 29 (1): 246-250. (in Chinese with English abstract)
- ZHUANG H Y, WANG X J, WANG R, et al., 2017. Characteristics of lateral deformation of soil-subway dynamic interaction system. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39 (10): 1761-1769. (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 陈文斌, 庄海洋, 李晟, 等, 2021. 基于柱顶隔震的3层3跨地铁地下车站结构抗震性能研究 [J]. *震灾防御技术*, (1): 146-156.
- 陈文化, 包汉营. 隧道衬砌-土层接触面黏-弹性对地铁空间振动传播的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, (202): 3460-3468.
- 陈曦, 陈清军, 2021. 近断层地震动作用下地铁车站中柱减震效果研究 [J]. *力学季刊*, 42 (1): 67-79.
- 陈之毅, 刘文博, 陈炜, 2020. 多层地铁车站结构性能试验研究 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 48 (6): 811-820.
- 崔芳鹏, 2009. 地震 P-S 波时差耦合作用的斜坡崩滑效应研究 [D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 杜修力, 王刚, 路德春, 2016. 日本阪神地震中大开地铁车站地震破坏机理分析 [J]. *防灾减灾工程学报*, 36 (2): 165-171.
- 杜修力, 马超, 路德春, 等, 2017. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析 [J]. *土木工程学报*, 50 (1): 53-62, 69.
- 杜修力, 李洋, 许成顺, 等, 2018. 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*, 40 (2): 223-236.
- 盖海龙, 姚生海, 杨丽萍, 等, 2021. 青海玛多“5·22”MS7.4 级地震的同震地表破裂特征、成因及意义 [J]. *地质力学学报*, 27 (6): 899-912.
- 谷坤生, 郭明珠, 唐学武, 等, 2022. 地震作用下反倾岩质斜坡动力响应规律及频谱特征研究 [J]. *地震工程学报*, 44 (1): 62-71.
- 国胜兵, 赵毅, 赵跃堂, 等, 2002. 地下结构在竖向和水平地震荷载作用下的动力分析 [J]. *地下空间*, 22 (4): 314-319.
- 韩学川, 陶连金, 刘春晓, 等, 2020. 连体并行地铁车站结构地震响应分析 [J]. *北京工业大学学报*, 46 (8): 929-939.
- 李杰, 李国强, 1992. *地震工程学导论* [M]. 北京: 地震出版社.
- 李洋, 许成顺, 杜修力. 阪神地震中大开地铁车站和区间隧道破坏差异成因研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40 (3): 326-336.
- 刘蕾, 刘雪玲, 周金喜, 2018. 地裂缝与斜交地铁隧道动力响应数值分析 [J]. *地质力学学报*, 24 (2): 238-243.
- 刘立波, 李海波, 刘亚群, 2017. 高陡边坡地震动放大效应分析 [J]. *长江科学院院报*, 34 (9): 98-103.
- 孟秋, 高宽, 陈启志, 等, 2021. 2008 年汶川大地震孕震、同震及震后变形和应力演化全过程的数值模拟. *地质力学学报*, 27 (4): 614-627.
- 陶连金, 刘春晓, 边金, 等, 2017. 大跨度 Y 形柱地铁车站结构地震反应研究 [J]. *力学学报*, 49 (1): 55-64.
- 陶连金, 刘硕, 韩学川, 等, 2019. 临近地上高层结构的地铁车站地震响应 [J]. *黑龙江科技大学学报*, 29 (5): 569-574.
- 汪精河, 周晓军, 刘建国, 等, 2017. 地震波斜入射下山岭隧道横向动力响应数值分析 [J]. *现代隧道技术*, 54 (3): 90-97.
- 熊良宵, 李天斌, 刘勇, 2007. 隧道地震响应数值模拟研究 [J]. *地质力学学报*, 13 (3): 255-260.
- 许成顺, 许紫刚, 杜修力, 等, 2017. 地下结构抗震简化分析方法比较研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 37 (2): 65-80.
- 许有俊, 梁玮真, 刘忻梅, 等, 2017. 大断面矩形顶管隧道开挖面土体稳定性研究 [J]. *现代隧道技术*, 54 (5): 70-77, 85.

- 杨雅琼, 王晓山, 万永革, 等, 2016. 由震源机制解推断唐山地震序列发震断层的分段特征 [J]. 地震学报, 38 (4): 632-643.
- 杨益飞, 关群, 孙若晗, 等, 2017. 基于 FLAC-3D 数值模拟分析逆作法的深基坑变形 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 40 (4): 522-527.
- 于仲洋, 张鸿儒, 邱滢佳, 等, 2021. 十字交叉型地铁车站结构的振动台试验研究 [J]. 振动与冲击, 40 (9): 142-151.
- 张奎, 李伟华, 赵成刚, 2020. 地震波斜入射下水下地基场地的等效线性化分析方法及应用 [J]. 振动与冲击, 39 (22): 41-49.
- 张文彬, 周海祚, 郑刚, 等, 2021. 地铁车站与隧道连接处地震响应分析 [J]. 地震工程学报, 2: 438-444.
- 张迎宾, 柳静, 唐云波, 等, 2021. 考虑边坡地形效应的地震动力响应分析 [J]. 地震工程学报, 43 (1): 142-153.
- 赵金, 吴红刚, 杨涛, 2019. 基于 FLAC3D 路桥不稳定边坡治理工程的动力响应研究 [J]. 世界地震工程, 35 (3): 177-185.
- 庄海洋, 程绍革, 陈国兴, 2008. 阪神地震中大开地铁车站震害机制数值仿真分析 [J]. 岩土力学, 29 (1): 246-250.
- 庄海洋, 王雪剑, 王瑞, 等, 2017. 土-地铁动力相互作用体系侧向变形特征研究 [J]. 岩土工程学报, 39 (10): 1761-1769.