

地下结构对场地和地表建筑地震响应影响分析

陈健云^{*1,2}, 何伟¹, 徐强¹, 李静¹

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 地铁车站等地下结构的建设, 必然会引起场地土层以及临近建筑物的地震动力响应发生变化. 为研究此种影响, 以某典型地下车站结构为研究对象, 引入了土体的非线性本构模型, 同时考虑了结构与土接触面特性和地基无限域的影响. 计算结果表明: 由于地下结构的存在, 地表一定范围内的地震动设计参数被显著放大; 临近地表建筑的位移响应、框架柱剪力响应也均被显著放大. 建议在地铁等地下工程的规划和设计时考虑工程建设后对地表设计地震动的影响.

关键词: 地下结构; 地震反应; 地表建筑; 场地地震动设计参数

中图分类号: TU471.8 **文献标志码:** A

0 引言

随着城市规模的扩大, 城市地面发展空间越来越小. 为了缓解城市空间发展压力, 城市繁华商业区的建筑群和主干道上修建了大量的地下空间结构. 从抗震角度来讲, 地下结构修建前后, 地震作用引起的场地土层的地震反应和临近建筑物的动力反应将不同于以前. 在 1985 年的墨西哥地震^[1]和 1994 年的洛杉矶地震中, 许多地铁隧道结构很少遭受到地震破坏, 但隧道临近的地表建筑有的却出现了很大的破坏情况. 目前国内外工程的建设中, 均没有考虑地下结构建设对场地设计地震动的影响, 因此, 有必要对此进行研究.

目前国内外学者对地下结构的地震反应都做了许多分析和研究, 而对地下结构建设后引起的场地土层和临近地表建筑物的地震反应变化的研究还比较少. 对该问题的研究, 可采用解析法和数值法. 解析法在问题本质分析方面有着重要的作用, 但是由于波动问题的复杂性, 解析法仅适用于一些简单的情况^[2~4]. 通过数值方法研究该问题具有现实的意义, 文献[5]采用有限单元法对软弱

地基浅埋隧洞开挖引起的场地地震效应的变化进行了数值模拟; 文献[6]采用有限差分法初步分析了地下结构的开发对场地地表反应谱的影响; 文献[7]研究了隧道对临近建筑物的地震反应影响. 本文针对该问题采用有限单元法, 选取地下车站结构为研究对象, 主要分析地铁车站结构对场地和临近地表建筑的地震响应影响.

1 计算模型

选取两层双柱三跨岛式地铁车站, 如图 1; 计算模型如图 2 所示. 地下车站结构与周围土体之间均设置摩擦接触对, 采用了基于允许弹性滑动罚接触算法^[8], 计算中假定筏基与土之间的摩擦因数 $\mu=0.3$.

本文采用基于 Davidenkov 骨架曲线^[9]的黏弹性非线性本构模型描述土体的动力特性. 初始加载段剪切模量计算公式如下:

$$G^{t+\Delta t} = \frac{\partial \tau_{\text{oct}}^{t+\Delta t}}{\partial \gamma_{\text{oct}}^{t+\Delta t}} = G_{\text{max}} \left[1 - \left[1 + \frac{2AB}{1 + |\gamma_{\text{oct}}/\gamma_0|^{2B}} \right] H(|\gamma_{\text{oct}}|) \right]_{t+\Delta t} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-04-04; 修回日期: 2011-05-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978043); 地震行业科研专项资助项目(200808026).

作者简介: 陈健云^{*} (1969-), 男, 教授, E-mail: eerd001@dlut.edu.cn.

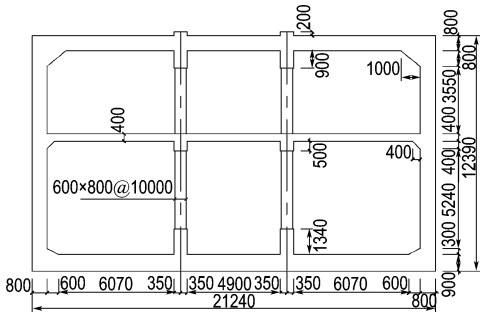


图 1 地铁车站断面尺寸图
Fig.1 The section size of subway station

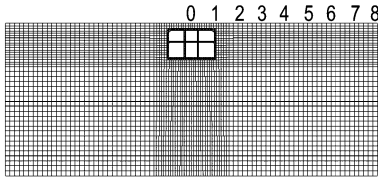


图 2 无地表建筑有限元模型
Fig.2 Finite element model without ground buildings

式中: $G_{\max}$ 为初始剪切模量, τ_{oct} 为八面体剪应力, γ_{oct} 为八面体剪应变, H 是描述应力 - 应变关系的基本形状函数, γ_0 为参考剪应变, A 、 B 为模型参数.

当土体处在加卸载状态时,剪切模量 $G^{t+\Delta t}$ 的计算公式为

$$G^{t+\Delta t} = \frac{\partial \tau_{\text{oct}}^{t+\Delta t}}{\partial \gamma_{\text{oct}}^{t+\Delta t}} = G_{\max} \times \left[1 - \left[1 + \frac{2AB}{1 + \left| \frac{\gamma_{\text{oct}} - \gamma_{\text{oct,c}}}{2\gamma_0} \right|^{2B}} \right] \times H \left(\left| \frac{\gamma_{\text{oct}} - \gamma_{\text{oct,c}}}{2} \right| \right) \right]^{t+\Delta t} \quad (2)$$

式中: $\gamma_{\text{oct,c}}$ 为八面体剪应力 - 剪应变滞回曲线加卸载转折点对应的剪应变.

为了考虑土体材料的黏性效应,按瑞雷阻尼概念,参考文献[10]假设阻尼矩阵只与刚度矩阵有关,因此,最终的应力 - 应变关系为

$$\sigma_{ij}^{t+\Delta t} = \tilde{\sigma}_{ij}^{t+\Delta t} + \alpha_1 D_{ijkl}^{\text{el}} \dot{\epsilon}_{kl}^{t+\Delta t} \quad (3)$$

式中 D_{ijkl}^{el} 为初始弹性刚度.

无限域的影响采用由 Bettess 等提出[11]的无限元模拟.

2 车站对场地地震动的影响

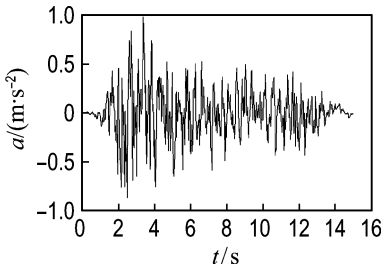
计算模型如图 2 所示,近场有限元计算域为 160 m×60 m.土层的物理参数见表 1,由于缺少

试验资料,特取 Seed 等[12]获得的典型砂土、黏土的非线性数据拟合 Davidenkov 模型的参数.地下车站结构埋深 2 m.接触面设为库仑摩擦型接触面.车站混凝土结构采用线弹性本构模拟,材料密度为 2 500 kg/m³,泊松比为 0.2,弹性模量为 32 GPa.基岩输入地震波采用由 I 类场地设计反应谱产生的人工波和 El-Centro 地震波,把 El-Centro 反演到基岩处,加速度时程如图 3 所示.加速度峰值均调整为 0.05 g(工况 1)、0.10 g(工况 2)、0.20 g(工况 3).

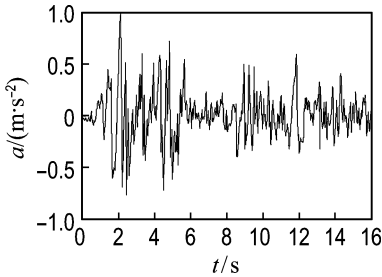
表 1 土层物理参数

Tab.1 Physical parameters of soils

土层	深度/m	密度/ (kg · m ⁻³)	剪切波速/ (m · s ⁻¹)	最大剪切 模量/MPa	泊松比
1	0~2.0	1 940	173	60.00	0.33
2	2.0~5.0	1 980	200	80.00	0.32
3	5.0~18.3	1 990	212	90.03	0.32
4	18.3~25.4	2 000	244	120.00	0.40
5	25.4~45.0	2 000	273	150.00	0.30
6	45.0~60.0	2 050	333	222.24	0.26



(a) 输入人工波



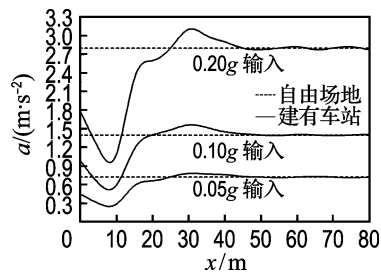
(b) 输入 El-Centro 波

图 3 加速度时程

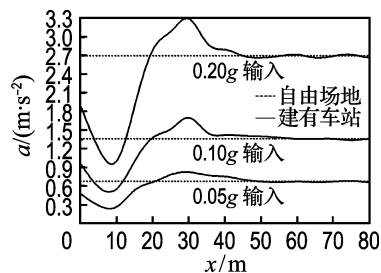
Fig.3 The time history of acceleration

为了便于反映地铁车站开挖对场地地表设计地震动的影响,假定车站结构正上方为中心 0 点,距中心点每隔 10 m 处为一个监测点(见图 2).图 4 给出了地表在 3 种峰值加速度地震波输入下地表最大加速度反应曲线.图 5、6 分别给出了在峰

值为 $0.1g$ 地震波输入下地表 0 点、3 点的地震加速度反应谱。



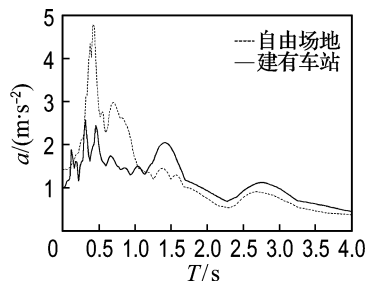
(a) 输入人工波



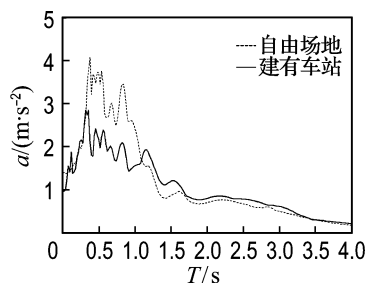
(b) 输入 El-Centro 波

图 4 地表最大加速度反应曲线

Fig. 4 The peak acceleration response curves of ground surface



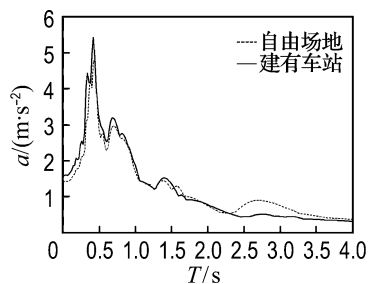
(a) 输入人工波



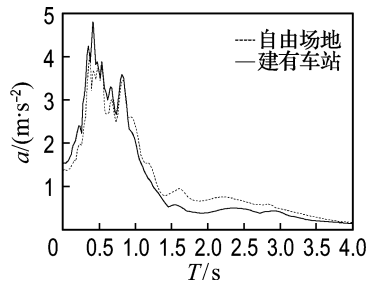
(b) 输入 El-Centro 波

图 5 基岩输入 $0.1g$ 地震波时地表 0 点地震加速度反应谱

Fig. 5 The acceleration response spectra on 0 point of ground surface for input acceleration of $0.1g$



(a) 输入人工波



(b) 输入 El-Centro 波

图 6 基岩输入 $0.1g$ 地震波时地表 3 点地震加速度反应谱

Fig. 6 The acceleration response spectra on 3 point of ground surface for input acceleration of $0.1g$

从图 4~6 可以看出:

(1) 在 3 种峰值加速度地震波输入下, 车站正上方地表的加速度反应较自由场地时均有显著的减小. 其中在距中心点 $x=10\text{ m}$ 处 (2 点), 加速度减小幅度最大. 在人工波输入下, 距地表中心点 $25\sim45\text{ m}$ 的水平范围内, 加速度反应比自由场地时明显增大. 在 El-Centro 波输入下, 距地表中心点 $20\sim40\text{ m}$ 的水平范围内, 加速度反应比自由场地时明显增大. 这表明由于地下结构的存在, 地表一定范围内, 地震动响应被显著放大.

(2) 由于地下车站结构的存在, 在地表中心点 (0 点) 处, 加速度反应在短周期内显著地减小; 在周期大于 1.0 s 时, 加速度反应与自由场地时基本相当, 或略大.

(3) 由于地下车站结构的存在, 在地表 3 点处, 加速度峰值最大, 且均大于自由场地情况. 在 3 点处的地震加速度反应, 在短周期时比自由场地情况下要大.

3 车站对地表建筑的地震动影响

计算模型如图 7 所示. 上部结构为三跨六层混凝土框架结构, 底层层高为 4.5 m , 其他各层均

为 3 m, 跨度为 6 m, 梁截面为 300 mm×600 mm, 柱截面为 600 mm×600 mm, 基础形式为筏板基础, 筏板厚取 0.5 m. 筏板基础与土体之间采用摩擦型接触对来联接. 上部结构左边柱与地下车站结构水平距离为 5 m. 上部结构采用线弹性本构模型模拟, 材料密度为 2 500 kg/m³, 泊松比为 0.2, 弹性模量为 30 GPa; 把填充墙的重量转化为梁的重量来考虑, 梁的密度为 3 926 kg/m³. 梁、柱和筏板均用平面梁单元来模拟. 模型的其他参数与前文相同. 输入加速度峰值为 0.10 g.

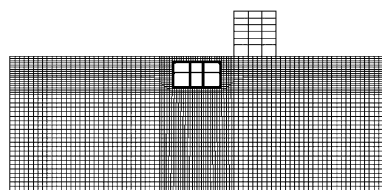
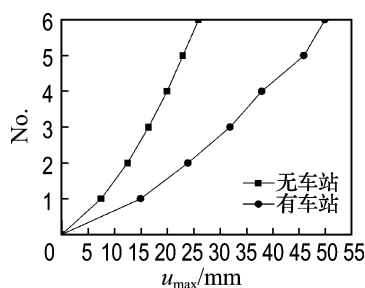


图 7 有限元模型图

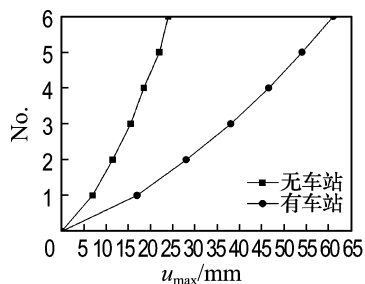
Fig. 7 Finite element model

3.1 框架位移分析

图 8 为两种地震波作用下框架柱各层与底层的最大水平相对位移. 图 9 为两种地震波作用下框架柱顶底水平相对位移时程. 从图中可以看出:



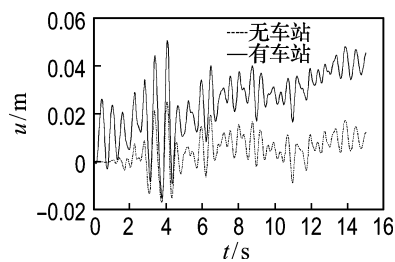
(a) 输入人工波



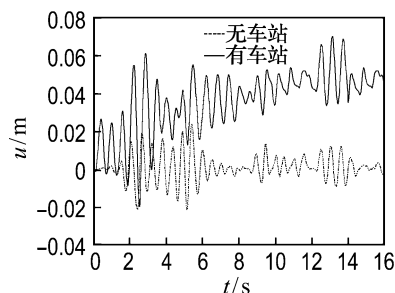
(b) 输入 El-Centro 波

图 8 框架柱各层与底层的最大水平相对位移

Fig. 8 Maximum horizontal relative displacement between the every storey and bottom of frame column



(a) 输入人工波



(b) 输入 El-Centro 波

图 9 框架柱顶底水平相对位移时程

Fig. 9 Time histories of horizontal relative displacement between top and bottom of frame column

(1) 在两种地震波作用下, 各层与底层的相对位移在地下有车站时均较无车站时要大. 这表明地下大空间结构的存在对地表建筑物的地震响应具有显著的影响.

(2) 在两种地震波作用下: 当无地下车站时, 框架柱左右摇摆; 当有地下车站时, 框架柱柱顶相对于柱底向无地下车站一侧偏移, 原因可能是地下车站本身相对于土体刚度较大, 使得左侧相对于右侧无地下车站的地基土体刚度增加, 这种刚度不对称导致了上部结构地震反应时的不对称. 总之, 在有地下车站时, 地表建筑框架结构的变形较大, 这增大了地表建筑的地震破坏响应.

3.2 框架柱的剪力峰值

为了比较有无地铁车站对地表建筑框架柱剪力的影响, 图 10、11 分别给出了基岩输入人工波和 El-Centro 波时框架柱各层的剪力峰值. 本文只讨论左边柱和左中柱的剪力情况. 无论哪种地震波输入, 中柱的各层剪力都大于边柱的各层剪力; 地下有车站时, 地表框架各层的剪力均大于无车站时各层的剪力. 图 10 表明在人工波作用下, 左边柱底层的剪力增幅较大, 达 21%. 左中柱的剪力最大增幅达 40%. 从图 11 可以看出, 在

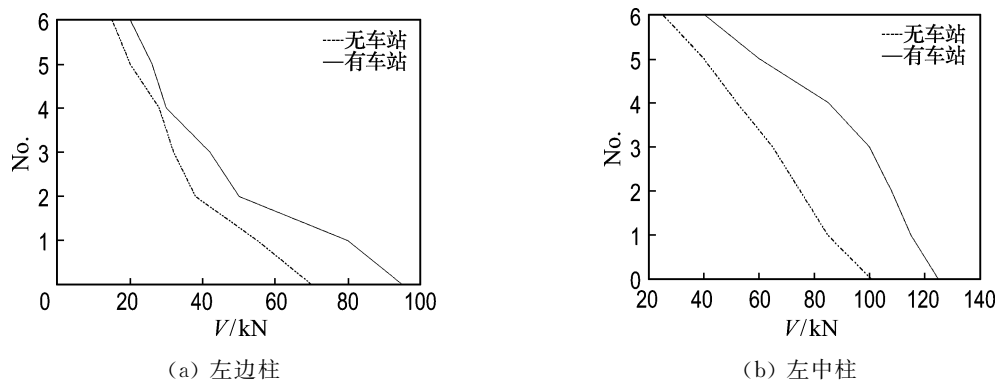


图 10 基岩输入人工波时框架柱的剪力峰值

Fig. 10 The largest shearing force of frame column subjected to the artificial earthquake wave

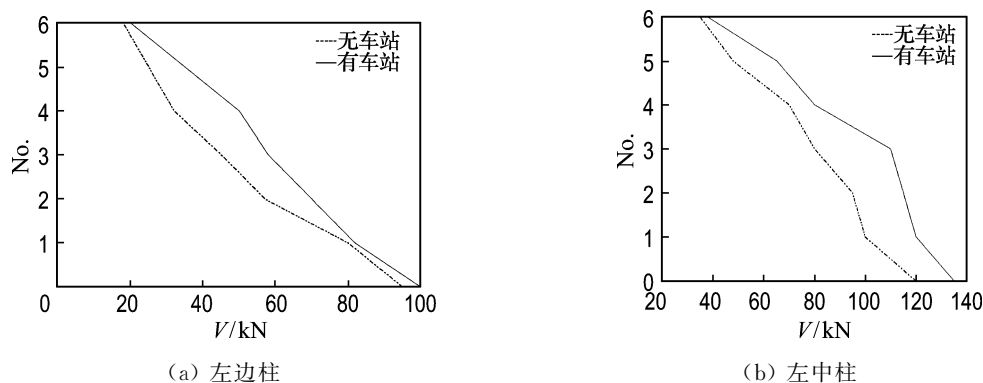


图 11 基岩输入 El-Centro 波时框架柱的剪力峰值

Fig. 11 The largest shearing force of frame column subjected to El-Centro wave

El-Centro 波作用下,左边柱和左中柱的各层剪力增幅相对于人工波时偏小,但剪力峰值比人工波作用时要偏大。

4 结 语

本文采用有限单元法,引入基于 Davidenkov 骨架曲线的黏弹性非线性本构模型,在计算模型中考虑了无限域的影响和结构与土的接触面特性,主要研究了城市地下车站结构的开发对地表及临近建筑的地震响应影响,得到一些有价值的规律。初步认为:由于地下车站结构的存在,在地表 30 m 处的范围内,地表加速度较自由场地时被显著放大。在地表建筑-土-地下结构共同作用体系分析中,地表框架结构的位移响应、框架柱剪力响应均被放大,且地表建筑结构顶层与基础的相对位移向无地下结构一侧偏移。

地下车站结构对场地设计地震动的影响,与场地条件、车站埋深、车站尺度、衬砌刚度、地表建

筑规模、地表建筑基础形式、地震波波长和入射角度等因素都有密切的关系。本文选用了特定的场地,没有考虑隧道埋深变化等因素的影响,接下来可以进行深入的研究。

参考文献:

- [1] FAHIMIFAR A. The prediction of seismic damages in tunnels and underground spaces and the method of controlling them [J]. **Journal of Ministry of Road & Transportation of Iran**, 2003, **48**:76-89
- [2] SMERZINI C, AVILES J, PAOLUCCI R, *et al.* Effect of underground cavities on surface earthquake ground motion under SH wave propagation [J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamic**, 2009, **38**(12):1441-1460
- [3] 陈志刚,刘殿魁. 椭圆孔对 SH 波散射的远场解[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, **24**(3):334-338
- [4] 梁建文,纪晓东,LEE V W. 地下圆形衬砌隧道对沿

- 线地震动的影响(1):级数解答[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4):520-524
- [5] 陈国兴, 庄海洋, 徐 烨. 软弱地基浅埋隧洞对场地设计地震动的影响[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(6):739-744
- [6] 何 伟, 陈健云, 于品清. 地下结构开发对场地地表反应谱影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(6):1098-1102
- [7] 杨书燕, 姜忻良, 李新国. 隧道对临近建筑物的地震反应影响分析[J]. 四川大学学报, 2007, **39**(3):41-46
- [8] GWINNER J, BROSOWSKI B. A penalty approximation for a unilateral contact problem in non-linear elasticity [J]. **Mathematical Methods in the Applied Sciences**, 1989, **11**(4):447-458
- [9] MARTIN P P, SEED H B. One dimensional dynamic ground response analysis [J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1982, **108**(7):935-954
- [10] 庄海洋, 陈国兴. 土体动非线性粘弹性模型及其在 ABAQUS 软件上的实现[J]. 岩土力学, 2007, **28**(3):436-442
- [11] BETTESS P, ZIENKIEWICZ O C. Diffraction and refraction of surface wave using finite and infinite elements [J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1977, **11**(8):1271-1290
- [12] SEED H B, IDRISS I M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis [R] // **Report No. EERC 70-10**. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1970

Analyses for effect of underground structure on seismic response of ground and adjacent surface buildings

CHEN Jian-yun^{*1,2}, HE Wei¹, XU Qiang¹, LI Jing¹

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: From the view point of seismic design, the existence of underground structures, such as subway stations, will greatly affect the seismic response of the ground and the buildings which are adjacent to the underground structures. In order to study this kind of effect, a typical underground station is selected, and a hysteretic nonlinear soil constitutive model is used for the analysis. The interaction finite element models take into account the contact surface characteristics of the structure and soil and the impact of foundation infinite domain. The analytical results show that the design parameters of ground motion in a certain range of site are significantly enlarged due to the existence of underground stations, and displacement response and frame column shear force response of ground buildings are apparently amplified. It is suggested that the effect of underground structures on ground motion is taken into consideration when the underground structures are planned and designed.

Key words: underground structures; seismic response; surface buildings; design parameters of ground motion