

隧道对地表临近既有建筑物层间位移影响分析*

郭靖¹,陈健云²,余流¹

(1.中国建筑第六工程局有限公司,天津 300451;2.大连理工大学 工程抗震研究所,辽宁 大连 116023)

摘 要:城市地下隧道的存在将改变地表临近既有建筑的地基条件,进而影响建筑的地震响应。基于广义层间位移谱,研究地下隧道对距隧道不同距离的地表建筑结构的层间位移的影响,同时分析隧道对结构层间位移沿无量纲高度分布的影响。结果表明:地下隧道的存在将增加临近地表建筑结构的层间位移,对结构的安全性带来危害,在工程设计和分析中不容忽视;当地表建筑位于距离隧道中心线2倍隧道直径的区域外时,隧道的影响可以忽略;隧道的存在对临近建筑结构层间位移沿高度分布趋势的影响并不明显,但是将显著增加结构抗震性能薄弱部位的层间位移。

关键词:层间位移谱;地震响应;邻近建筑;层间位移分布

中图分类号:TU471.8 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)02-0765-08

Influence of Tunnel on Inter-story Drift of Adjacent Structures

Guo Jing¹,Chen Jianjun²,Yu Liu¹

(1. China Construction Sixth Engineering Division Co. Ltd., Tianjin 300451, P.R.China; 2.Institute of Earthquake Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, P.R.China)

Abstract: Existence of tunnel in urban area changes the foundation conditions of nearby existing structures, affecting the seismic response of buildings. Generalized inter-story drift spectrum, in which the existing structures were equivalently simplified as combined shear-flexural beams, was used to analyze the influence of tunnel on inter-story drift of nearby buildings with different distances from the tunnel; meanwhile, the influence of the tunnel on the inter-story drift distribution along the dimensionless height was studied and discussed. It is illustrated that existence of tunnel increases the inter-story drift of structures, so more attention should be paid in engineering design and analysis; when the building is located away from the tunnel with distance of 2.0 times diameter length of the tunnel, the effect of the tunnel can be ignored. Additionally, the existence of the tunnel does not influence the inter-story drift ratio distribution along dimensionless height, however, it increases the inter-story drift of the anti-seismic weakness location of the building, which should be considered carefully.

Keywords: inter-story drift spectrum; seismic analysis; adjacent structures; inter-story drift distribution

0 引言

随着城市交通拥挤问题日益严峻,地铁地下交通系统的开发越来越得到重视。地面既有建筑物的抗震设计和基础处理措施多是基于地基下没有

隧道的情况进行设计的,地铁隧道的修建将改变所在地原有的场地条件,对邻近建筑物产生影响。目前关于隧道对邻近建筑物的影响研究多集中于隧道施工阶段对邻近建筑静态指标(如地表沉降^[1-3]等)的影响,或者分析隧道的地震响应及其抗震设

* 收稿日期:2016-06-10(修改稿)
作者简介:郭靖(1983-),男,河北张家口人,博士,工程师,主要从事地下工程结构抗震研究。
E-mail: guojing124@163.com
基金项目:国家自然科学基金(50978043)

计方法^[4-6],而针对隧道对其邻近建筑物动力响应影响的研究并不多见,杨书燕等^[7]对不同基础形式下隧道对邻近建筑物的地震反应进行分析,其研究基于特定建筑模型,未考虑高层结构的层间位移。

本文基于广义层间位移谱,结合有限元模型,针对在地震动作用下,隧道的存在对距隧道不同距离的地表建筑结构层间位移的影响进行研究;同时分析了隧道对层间位移沿结构高度分布的情况,并得出相应结论。

1 广义层间位移谱

层间位移角(Interstory Drift Ratio)定义为相邻两层位移之差与层高的比值,用于控制结构的侧向刚度^[8]。国内外建筑抗震设计规范中均将层间位移角作为建筑结构变形的重要参考指标进行抗震设计和安全评定^[9]。层间位移谱表述结构基本周期与最大层间位移角之间的关系,能够直接计算结构的最大层间位移角,对建筑结构抗震设计具有重要的意义。

层间位移谱法由 Iwan^[10] 基于波动理论于 1997 年首次提出。随后 Chopra 等^[11] 进行深入研究后指出,可以通过振型分析法取足够多的振型计算层间位移谱。Gulkan 等^[12] 根据 Iwan 的成果,提出了层间位移角的简化计算公式。需要指出的是,上述方法和研究内容都是基于将建筑结构等效简化为连续的剪切梁,而并不能适合地表示梁柱刚度比不大而且具有斜撑或剪力墙的框架体系。Miranda 等^[13] 根据 Chopra 等的研究,基于振型分析法,将建筑结构等效简化为弯曲梁和剪切梁的组合模型,提出了广义层间位移谱,进而可以代表更多类型的建筑,拓展了层间位移谱的应用范围。

广义层间位移谱简化分析模型如图 1 所示^[12]。

由图 1 可知,弯剪型悬臂梁由弯曲悬臂梁和剪切悬臂梁通过水平刚性连杆连接组合而成,假设质量和刚度均匀分布,可以同时考虑由弯曲和剪切引起的结构变形。

无阻尼连续弯剪组合梁模型在基础受水平加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 作用时,其动力反应方程可表示

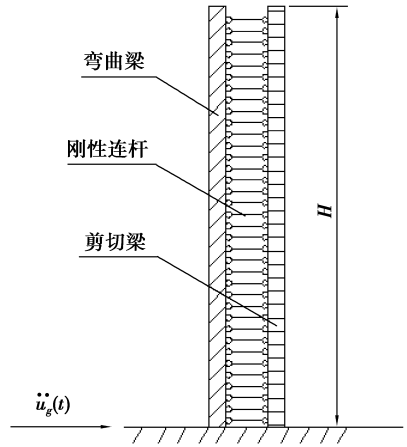


图 1 弯剪型悬臂梁模型

Fig.1 Shear-flexural cantilever beam model

如下^[13]:

$$\frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \frac{1}{H^2} \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial t^4} - \frac{\alpha^2}{H^4} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = - \frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 u_g(t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: ρ 为模型单位长度质量; H 模型总高度; $u(x,t)$ 为 t 时刻在无量纲高度 $x=z/H$ (结构底部取 0,顶部取 1)的侧向位移; EI 表示抗弯刚度;无量纲参数 $\alpha = H \cdot \sqrt{GA/EI}$,为侧向刚度比,表示弯曲变形和剪切变形参与整体变形的程度。 GA 为剪切刚度。

当 $\alpha=0$ 时,表示纯弯曲模型; $\alpha=\infty$,表示纯剪切模型;取中间值则表示结构整体变形由弯曲和剪切变形共同作用产生。Miranda^[14] 研究表明,当 $\alpha=650$ 时可以表示纯剪切结构,而当 α 取 5~20 时可以表示弯剪框架结构。

假设 $\ddot{u}_g(t) = 0$,可得悬臂梁自由振动的振型函数为:

$$\varphi_i(x) = \sin(\gamma_i x) - \frac{\gamma_i}{\beta_i} \sinh(\beta_i x) - \eta_i \cos(\gamma_i x) + \eta_i \cosh(\beta_i x) \quad (2)$$

式中: γ_i 为第 i 阶振型的特征值,通过特征方程求出^[13]; β_i 和 η_i 为第 i 阶振型的无量纲参数,由下式求出:

$$\begin{cases} \beta_i = \sqrt{\alpha^2 + \gamma_i^2} \\ \eta_i = \frac{\gamma_i^2 \sin(\gamma_i) + \gamma_i \beta_i \sinh(\beta_i)}{\gamma_i^2 \cos(\gamma_i) + \beta_i^2 \cosh(\beta_i)} \end{cases} \quad (3)$$

假设弯剪梁模型是经典阻尼体系,则第*i*振型在*t*时刻、无量纲高度 $x=z/H$ 处的侧向位移贡献表示如下:

$$u_i(x,t) = \Gamma_i \varphi_i(x) D_i(t) \tag{4}$$

式中: Γ_i 为第*i*振型参与系数; $\varphi_i(x)$ 为第*i*振型在无量纲高度*x*处的振幅; $D_i(t)$ 是周期为 T_i 、阻尼比为 ξ_i 的弹性单自由度体系在地面加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 作用下的位移反应。

广义层间位移谱以振型分析为基础,体系的总位移可以通过振型叠加法计算求得:

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} u_i(x,t) \tag{5}$$

无量纲高度*x*处的层间位移角可由位移 $u(x,t)$ 对*x*求一阶导数求得

$$\theta(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^{\infty} \Gamma_i \varphi'_i(x) D_i(t) \tag{6}$$

式中: $\varphi'_i(x)$ 表示第*i*振型对*x*的一阶导数。

在已知结构的基本周期 T_1 的情况下,高阶自振周期 T_i 可通过下式求的:

$$\frac{T_i}{T_1} = \frac{\gamma_1}{\gamma_i} \sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \alpha^2}{\gamma_i^2 + \alpha^2}} \tag{7}$$

各阶振型的参与系数可用下式计算:

$$\Gamma_i = \frac{\int_0^1 \varphi_i(x) dx}{\int_0^1 \varphi_i^2(x) dx} \tag{8}$$

在广义层间位移谱法中利用结构第*j*层中部的转角估计本层的层间位移角,如下所示:

$$IDR(j,i) \approx \theta(x,t) = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^{\infty} \Gamma_i \varphi'_i(x) D_i(t) \tag{9}$$

式中:*x*为第*j*层和第*j*+1层层高的平均值。

Miranda^[15]的研究表明,大多数情况下,只需要提取前几阶振型就已经能够满足精度要求。因此,式(9)可简化为:

$$IDR \approx \frac{1}{H} \sum_{i=1}^m \Gamma_i \varphi'_i(x) D_i(t) \tag{10}$$

式中:*m*为计算所提取的振型数。

综上所述,不同固有周期结构的最大层间位移角为:

$$IDR_{\max} = \max_{\forall x,t} |\theta(x,t)| \approx \max_{\forall x,t} \left| \frac{1}{H} \sum_{i=1}^m \Gamma_i \varphi'_i(x) D_i(t) \right| \tag{11}$$

由推导过程可知,如果已知结构的基本周期,则可以进一步计算出层间位移沿无量纲高度 z/H 的分布情况。

2 分析方法和计算模型

2.1 分析方法

本文在Abaqus分别建立相同参数的有隧道和无隧道有限元模型,在模型底部输入水平向地震波,选取隧道直径为*d*;分别提取模型地表对应隧道正上方节点($L=0$ m)、紧靠隧道侧节点($L=0.5d$)、距离隧道中心线水平距离为 $L=1.0d$ 、 $L=1.5d$ 和 $L=2.0d$ 处节点的水平向加速度时程作为存在隧道工况所输入加速度 $\ddot{u}_g(t)$,如图2所示,借此表示建筑结构位于隧道对应地表不同距离的算例。虽然无隧道时地表水平加速度并无变化,为了最大限度地消除模型计算的误差,提取无隧道模型中对应隧道模型所选取的相同位置的节点的加速度时程作为自由场工况 $\ddot{u}_g(t)$ 输入。

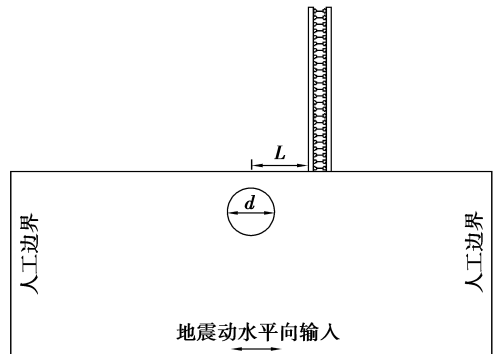


图2 分析示意图

Fig.2 Analysis schematic diagram

根据现有研究成果^[12-14],选取弯剪梁刚度比 $\alpha=20$ 表示弯剪框架结构^[14],提取前6阶振型,假设阻尼比 $\xi_i=0.05$ 。

本文选用 Kobe 波(KJM-UP, Kobe, 1995)和 EL centro 波(EL centro-NS, 1940),由模型底部水平向输入,加速度峰值为 $0.2g$,加速度时程和反应谱分别如图3和图4所示。

2.2 有限元计算模型

某圆形断面地铁隧道,隧道埋深9 m,外径为6 m,衬砌厚0.4 m,衬砌混凝土标号为C30;模型水平计算范围为120 m,竖直向为52 m,模型及网格划分如图5所示。

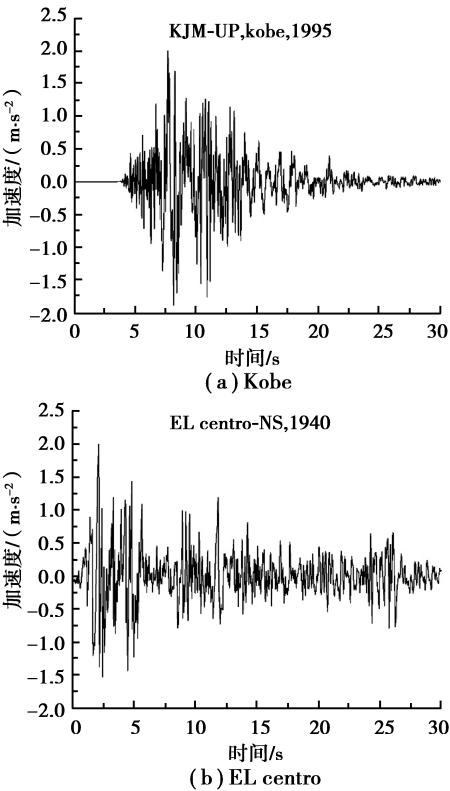


图 3 地震动加速度时程
Fig.3 Seismic accelerate time history

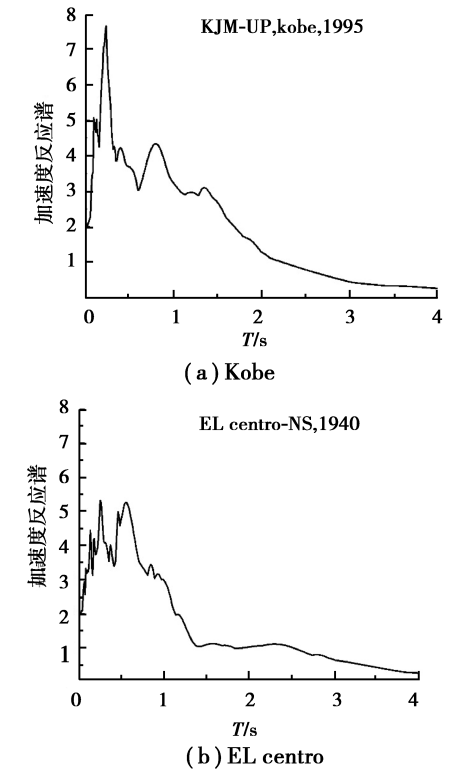


图 4 加速度反应谱
Fig.4 Accelerate response spectrum

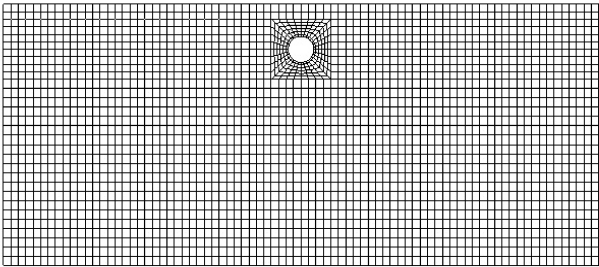


图 5 隧道有限元模型
Fig.5 Finite element model of tunnel

假设土体为服从 Drucker-Prager 屈服准则的弹塑性模型,场地土层参数如表 1 所示。由于并不考虑隧道的动力响应,故将混凝土视为线弹性模型,不考虑土体与隧道之间的接触。

表 1 场地土层参数

Table 1 Parameters of site condition							
土层	厚度 h/m	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性 模量 $/\text{MPa}$	泊松 比 μ	摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	剪切 波速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	粘聚 力/ kPa
I	2	1 900	21	0.33	22	102	11
II	20	1 900	85	0.33	20	123	25
III	15	1 950	164	0.40	20	167	15
IV	15	2 000	313	0.40	24	228	20

模型底部为固定边界。为消除模型有限计算区域截断边界处波的反射的影响,本文在模型两侧边界处施加粘弹性人工边界^[15],即在切向和法向均设置阻尼器和弹簧,计算参数如下:

$$\begin{cases} K_N = \frac{1}{1 + \alpha} \cdot \frac{\lambda + 2G}{2r} \cdot A, C_N = \beta \cdot \rho v_p \cdot A \\ K_T = \frac{1}{1 + \alpha} \cdot \frac{G}{2r} \cdot A, C_T = \beta \cdot \rho v_s \cdot A \end{cases} \quad (12)$$

式中: ρ 为介质的密度; A 为边界节点所代表的面积; $v_p = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho}$, $v_s = \sqrt{G/\rho}$ 分别为 P 波和 S 波波速; α 为平面波与散射波的幅值含量比, β 表示物理波速和视波速的关系,两者均可通过数值试验获得。根据文献[16],建议取值为 $\alpha = 0.8, \beta = 1.1$ 。 r 取为所模拟地表中心点到人工边界最近点与最远点距离的平均值,有利于减少误差^[17]。

无隧道有限元模型的参数与上述模型一完全致,仅将隧道部分还原为计算土层。此外,所建模

型对称分布,本文只取模型右侧节点进行分析计算。

3 计算结果分析

图6给出了当 $L=0$, (即结构位于隧道上方)时,有、无隧道工况下广义层间位移谱的计算结果。从图中可以看出,存在隧道时,结构的层间位移角将会有所增加,根据本文算例,在特征周期附近和在 $1.0\sim 2.0\text{ s}$ 周期部分的增幅最为显著,其他周期范围的变化并不明显。

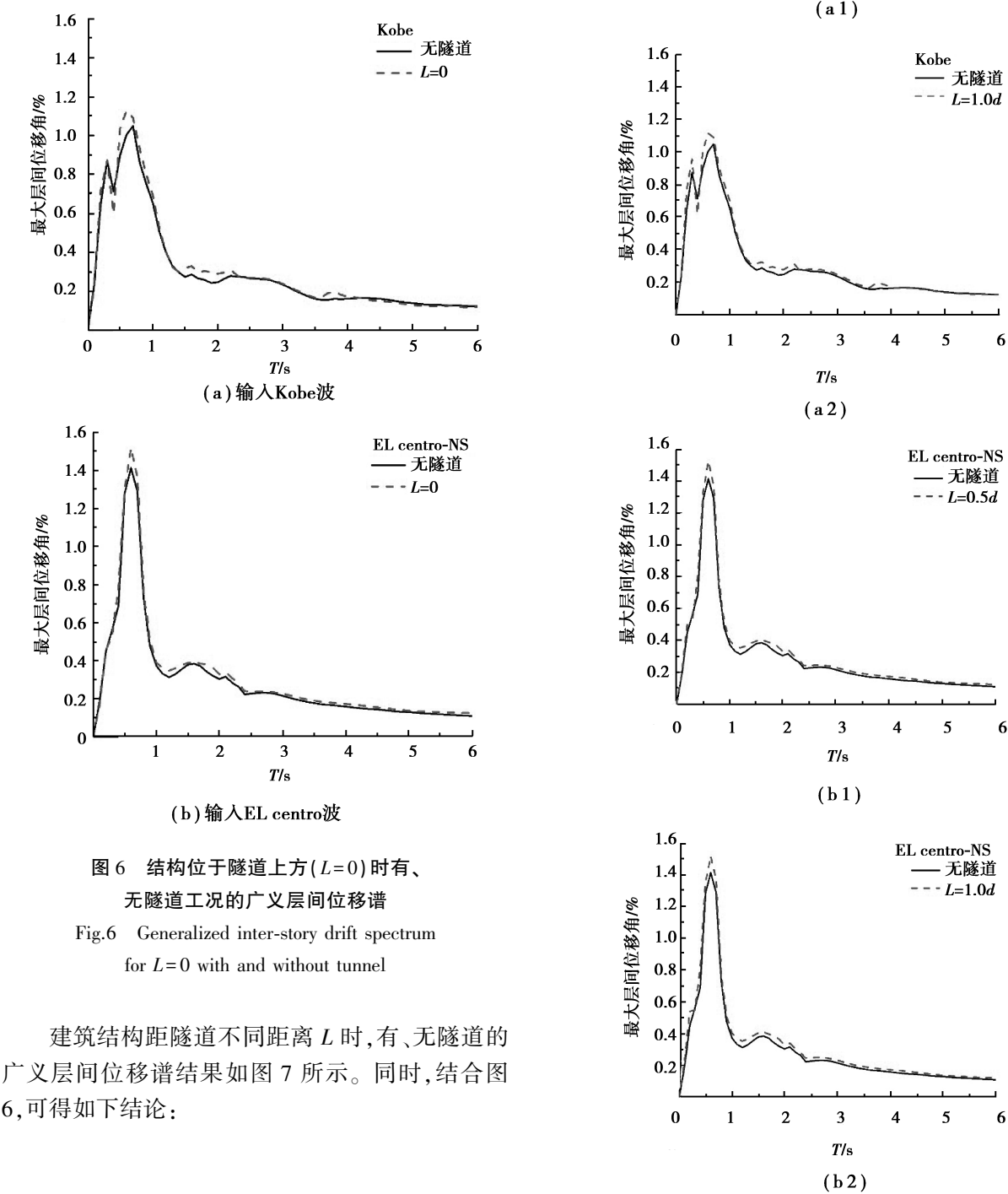


图6 结构位于隧道上方($L=0$)时有、无隧道工况的广义层间位移谱
Fig.6 Generalized inter-story drift spectrum for $L=0$ with and without tunnel

建筑结构距隧道不同距离 L 时,有、无隧道的广义层间位移谱结果如图7所示。同时,结合图6,可得如下结论:

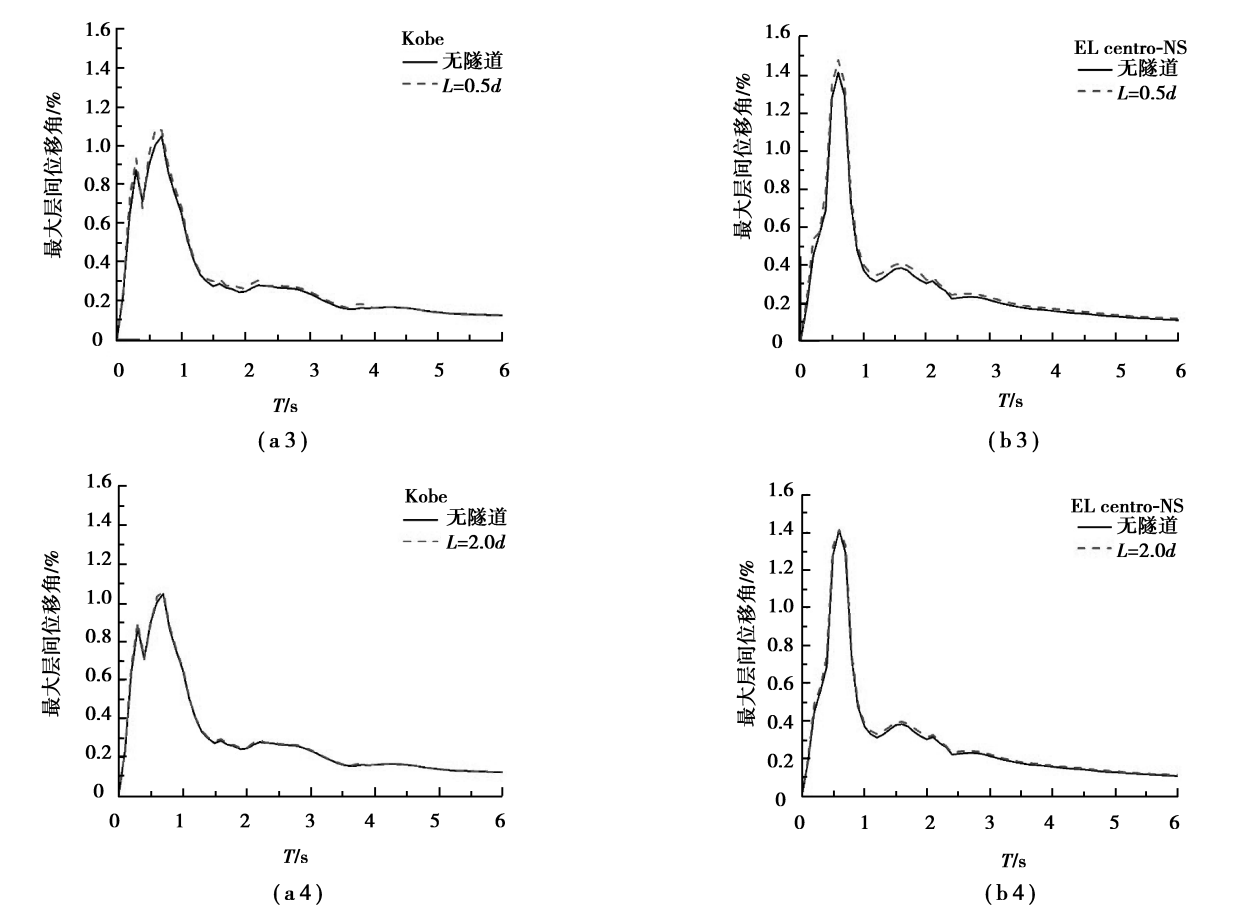


图 7 建筑结构位于不同距离 L 时有、无隧道工况的广义层间位移谱

Fig.7 Generalized inter-story drift spectrum for different distance L with and without tunnel

(1)与自由场结果相比较,隧道的存在将会在不同程度上增加临近建筑结构的层间位移角,对结构的抗震性能带来不利影响。其中,以特征周期附近以及在 $1.0\sim2.0\text{ s}$ 周期范围的增幅最显著;而对于 $T>3\text{ s}$ 的长周期结构,相较于短周期结构而言隧道的影响并不明显。

(2)随着建筑结构距隧道距离 L 的增加,由于隧道存在所引起的结构层间位移角的增幅逐渐减小,表明隧道的影响在逐渐减小。当结构距离隧道水平距离为 2 倍隧道直径 d 时,如图 7(a4)和(b4)所示,有、无隧道工况的计算结果已几乎重合,表明隧道的存在对结构的抗震性能几乎无影响。

为进一步量化分析隧道的存在对层间位移角的影响程度,表 2 给出有、无隧洞工况时,距隧道不同水平距离 L 处结构层间位移角峰值的计算结果。

表 2 距隧道水平距离 L 处的 IDR 峰值

		Table 2 Peak value of IDR for locations with different distance L from the tunnel					
		无隧道	有隧道				
			$L = 0$	$L = 0.5d$	$L = 1.0d$	$L = 1.5d$	$L = 2.0d$
Kobe 波	IDR 峰值/%	1.048	1.129	1.127	1.114	1.083	1.057
	增幅/%	—	7.7	7.5	6.3	3.3	0.9
EL 波	IDR 峰值/%	1.403	1.516	1.522	1.515	1.477	1.413
	增幅/%	—	8.1	8.5	8.0	5.3	0.7

从表2可以明显看出,隧道的存在将会增加临近建筑结构的层间位移角,并且对于距离隧道中心线1倍隧道直径的范围内的结构的影响最为显著,如EL波计算结果在该范围内的增幅均达到或超过8%;随着距离 L 的进一步增加,增幅将逐渐减小,当距离 $L=2.0d$ 时,在输入两种地震波计算工况下,层间位移角的增幅均小于1%,表明隧道的存在对该距离以外的地表结构抗震性能的影响已经很小,可以忽略。

4 隧道对层间位移分布的影响

从图6和图7可以看出,隧道的存在对 $T=0.6\text{ s}$ 的短周期结构和 $T=2.0\text{ s}$ 的较长周期结构的影响十分明显,本节进一步分析这两种结构层间位移沿无量纲高度的分布情况。限于篇幅,仅选取距离 $L=0$ 的工况作为计算范例,其余参数选取同第2节。

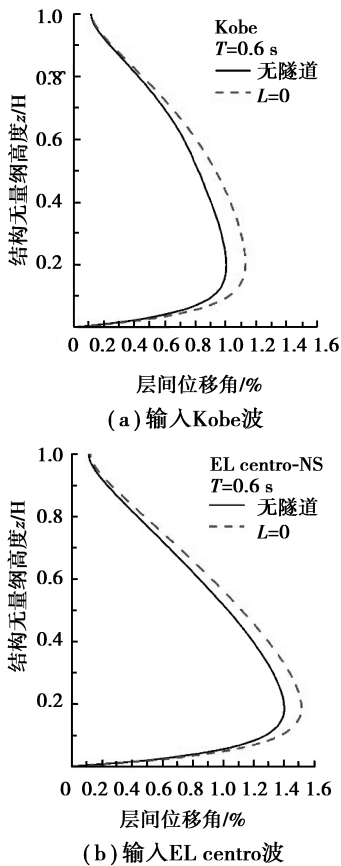


图8 结构层间位移角沿无量纲高度分布图($T=0.6\text{ s}$)

Fig.8 Inter-story drift ratio distribution along dimensionless height for $T=0.6\text{ s}$

从图8可以看出,短周期弯剪组合结构的层间位移分布形状类似字母“D”,结构的最大层间位移

角出现在结构中下部,大约位于结构高度 $z/H=0.15$ 的部位。由于隧道的存在,该部位附近高度的层间位移角将会明显增加,给结构安全性带来隐患;长周期结构的层间位移分布如图9所示,由于隧道的存在,结构的中上部($z/H=0.7$)附近,以及接近结构底部($z/H=0.15$)附近的层间位移角都将明显增加。因此,在对隧道临近建筑结构进行分析和评估时,建议对上述两部位进行特殊考虑。结合图8和图9可知,隧道存在对结构层间位移分布趋势的影响并不明显,但是却会显著增加抗震性能薄弱部位的层间位移,隧道的影响不容忽视。

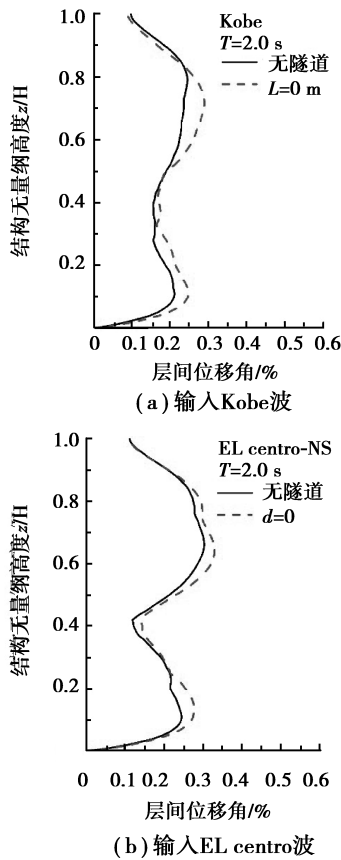


图9 结构层间位移角沿无量纲高度分布图($T=2.0\text{ s}$)

Fig.9 Inter-story drift ratio distribution along dimensionless height for $T=2.0\text{ s}$

5 结论

- (1)隧道的存在将会增大临近地表建筑结构的层间位移角,对结构的抗震安全性带来不利的影响,尤其是对位于隧道中心线1倍隧道直径区域内的结构的影响最为明显。本文算例最大增幅分别达到7.7%和8.5%,隧道的影响不容忽视。
- (2)随着距离隧道水平距离的增加,隧道的存在所引起的结构的层间位移的增幅将逐渐减小,当

地表建筑结构位于距隧道中心线水平距离为2倍隧道直径以外的区域时,隧道的影响已经可以忽略。

(3)隧道的存在不会影响结构层间位移的分布趋势,但是却将显著增加结构抗震性能薄弱部位的层间位移,比如短周期结构的中下部位和长周期结构的中上部位以及中下部位。

本文的结论基于特定算例,期望能提供工程参考,但具有一定局限性,实际工程情况复杂多变,需要深入研究。此外,考虑地下结构的影响需要考虑地震波的传播以及隧道的尺寸、埋深等因素,将成为接下来深入分析的内容。

致谢:衷心感谢大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室杨迪雄教授在对广义层间位移谱理论学习和程序编制的热心指导和帮助。

参考文献(References)

- [1] Mroueh H, Shahrour I. A full 3-D finite element analysis of tunnelling-adjacent structures interaction[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 245-253.
- [2] Dimmock P S, Mair R J. Effect of building stiffness on tunneling-induced ground movement[J]. Tunnelling Under-ground Space Technology, 2008, 23(4): 438-450.
- [3] Huang M, Zhang C, Li Z. A simplified analysis method for the influence of tunneling on grouped piles[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 410-422.
- [4] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(4): 247-293.
- [5] Bobet A. Drained and undrained response of deep tunnels subjected to far-field shear loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(1): 21-31.
- [6] Hashash Y M A, Park D, Yao I C. Ovaling deformations of circular tunnels under seismic loading, an update on seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(5): 435-441.
- [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(工程科学版), 2007, 39(3): 41-46. (Yang Shuyan, Jiang Xiliang, Li Xinguo. Analysis on seismic response effect of tunnel to nearby structure[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 29(3): 41-46. (in Chinese))
- [8] Algan B B. Drift and damage consideration in earthquake resistant design of reinforced concrete buildings[D]. University of Illinois, Urbana-Champaign, 1988.
- [9] 丰定国,王社良.抗震结构设计(第二版)[M].武汉:武汉理工大学出版社,2003. (Feng Dingguo, Wang Sheliang. Seismic design of structure (Second Edition)[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003. (in Chinese))
- [10] Iwan W D. Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(4): 397-404.
- [11] Chopra A K, Chintanapakdee C. Drift spectrum versus modal analysis of structure response to near-fault ground motions[J]. Earthquake Spectra, 2001, 17(2): 221-234.
- [12] Gulkan P, Akkar S. A simple replacement for the drift spectrum[J]. Engineering Structures, 2002, 24(11): 1477-1484.
- [13] Miranda E, Akkar S D. Generalized interstory drift spectrum[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(6): 840-852.
- [14] Miranda E, Ryses C J. Approximate lateral drift demands in multistory buildings with nonuniform stiffness[J]. Journal of Structure Engineering, 2002, 128(7): 840-849.
- [15] Miranda E, Taghavi S. Approximate floor acceleration demands in multistory building I: Formulation[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(2): 203-211.
- [16] 杜修力,赵密,王进廷.近场波动模拟的人工应力边界条件[J].力学学报,2006,38(1): 49-56. (Du Xiuli, Zhao Ming, Wang Jinting. A stress artificial boundary in FEM for near-field wave problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 49-56. (in Chinese))
- [17] 王子辉.饱和两相与单相土互层场地中地铁车站地震反应分析[D].北京:北京交通大学,2008. (Wang Zihui. Seismic Analysis of Subway Station in a Site Interbedded by Saturated Two-phase and Single-phase Soil[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, Beijing, 2008. (in Chinese))