

DOI: 10.11779/CJGE201402010

下穿隧道 - 土 - 地表邻近框架结构相互作用体系 地震响应初步分析

王国波¹, 于艳丽², 何 卫²

(1. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 在中国城市轨道交通快速发展的推动下, 隧道等地下结构近距离下穿地表建筑物的案例越来越多。对于相互穿越工程, 较多的关注在于隧道等地下结构动态施工对地表建筑物安全的影响, 而忽视了隧道建成后对被穿越的地表临近建筑物抗震性能的影响。拟结合某实际工程, 建立盾构隧道 - 土体 - 地表邻近框架结构相互作用体系二维数值计算模型, 对比分析隧道与邻近框架结构相互之间地震响应影响规律。计算分析表明: ①隧道的存在使隧道两侧土体表面出现一个地震响应放大区; ②下穿隧道对地表框架结构的地震响应有部分影响, 但影响程度有限; ③地表结构的存在对隧道结构地震响应的影响较小, 可忽略不计。研究成果可为地下结构的规划以及地表结构与地下结构的抗震设计提供参考。

关键词: 盾构隧道; 穿越工程; 隧道 - 土体 - 框架结构相互作用体系; 地震响应

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)02-0334-05

作者简介: 王国波 (1979-), 男, 主要从事工程结构的抗震分析方面的研究。E-mail: wgb16790604@126.com。

Seismic response of interaction system of underlying tunnels, soils and adjacent frame structures

WANG Guo-bo¹, YU Yan-li², HE Wei²

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2.

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Promoted by the rapid development of urban rail traffic in China, more and more cases of underground structures, such as tunnels, have crossed the surface buildings with very close distance. As to the intersecting project, much attention has been paid to the influence of dynamic construction of underground structures on the safety of the adjacent surface buildings, but that on the seismic response of the adjacent surface buildings is usually neglected. Based on a practical project, a coupled interaction calculation model for tunnel-soil-adjacent frame structure is established, and the influence of the tunnel and frame structures on their seismic response is analyzed. The calculation and analysis show that: (1) a seismic response enlarged zone occurs on soil surface; (2) the underlying tunnel has influence on the seismic response of the frame structures, but the influence extent is small; (3) the influence of the frame structures on the underlying tunnel is very small, which can be neglected. The research results may provide references for the planning of underground structures and the seismic design of surface buildings and underground structures.

Key words: shield tunnel; intersecting project; tunnel-soil-frame interaction system; seismic response

0 引言

隧道 - 土体 - 地表结构相互作用体系是一个复杂的相互作用体系, 其主要包括隧道 - 土体相互作用子体系和土体 - 地表结构相互作用子体系。针对上述 2 个子体系地震响应的研究成果已十分丰富。但针对隧道 - 土体 - 地表结构复杂体系地震响应的研究直到最近几年才引起部分学者的关注, 如梁建文等^[1]分析了地铁车站和隧道群对场地土动力特性的影响; 何伟^[2]

和李方杰^[3]研究了地铁车站结构 - 地表结构体系的二维地震响应规律; 陈国兴等^[4]研究了隧洞开挖引起场地地震效应的变化规律; 徐炳伟^[5]以天津站交通枢纽工程为背景, 开展了大型复杂结构 - 桩 - 土体系振动台模型试验研究。但上述研究工作一方面仍偏重于某一个子体系; 另一方面, 在具体的计算分析中大多没有

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51208406)

收稿日期: 2013-06-17

考虑土-隧道或土-地表结构间的相互作用。因此,本文拟建立土体-隧道-地表结构完整的复杂体系计算模型,通过在土-隧道与土-地表结构之间设置接触面单元以考虑土-结构间相互作用,从而更细致地分析隧道-土-地表结构相互作用体系地震响应规律。

1 计算模型

1.1 计算工况

考虑实际工程情况以及为简化计算,本文考虑的地表结构为对称的框架结构,暂不考虑不规则结构的扭转效应;考虑的隧道为截面无变化的盾构隧道。因此,可将实际的三维空间模型简化为二维的平面模型。为对比分析隧道与地表结构间的相互影响,本文建立了4种计算模型:①自由场模型(图1(a));②隧道-土体模型(图1(b));③土体-地表结构模型(图1(c));④隧道-土体-地表结构模型(图1(d))。

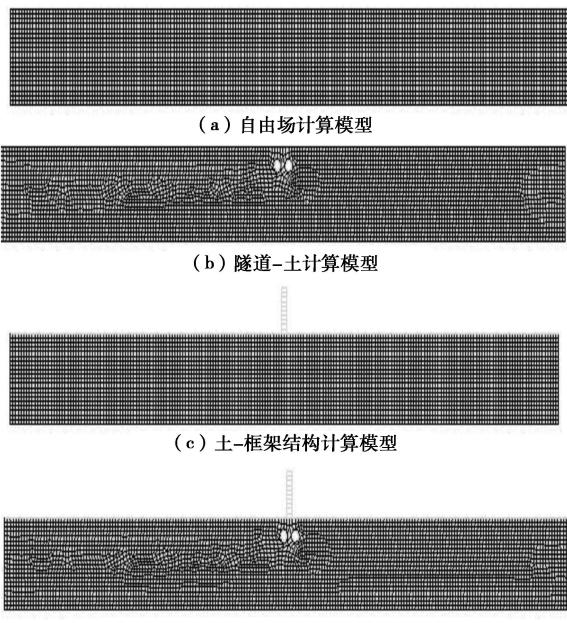


图1 计算工况及对应计算模型

Fig. 1 Computational cases and corresponding models

1.2 主要计算参数

为减少过多因素对体系地震响应的影响,本文仅考虑单层匀质土的情形,计算参数:剪切波速200 m/s,质量密度1900 kg/m³,泊松比0.4。目前在ANSYS等计算分析软件中均没有成熟的可直接使用的本构模型已考虑土体的非线性特性,均需进行必要的二次开发。笔者也正在进行该方面的努力,因而文中土体依然采用弹性模型。

隧道半径为3 m,两隧道中心线间距D为12 m,隧道埋深(隧道中心线距地表的距离)为12 m。隧道衬砌结构采用C50混凝土,弹性模量为35 GPa,密度

为2500 kg/m³,泊松比为0.2。

地表结构为10层框架结构,正好位于两隧道正中间。框架结构为C30混凝土,弹性模量为30 GPa,密度为2500 kg/m³,泊松比为0.2,其中柱子横截面尺寸为0.4 m×0.4 m,柱子间距为6 m,楼板厚度为0.2 m,底板厚度综合考虑基础的影响后取为0.6 m。

1.3 计算范围

根据已有研究成果^[6],在计算范围的宽深比达到10时,边界条件的影响可忽略不计。本文根据该施工工程所在地区的情况,在60 m深度处基本上达到了基岩面,因此,计算深度取60 m,水平宽度则取600 m。依据文献[6]的结论,对于仅考虑水平地震动输入的情形,此时在模型两侧可设置水平(x向)自由、竖向(y向)约束的侧向滑移边界。当然,也可按文献[7]的方法设置黏性边界,笔者以自由场地震响应分析为例,对2种边界下的响应进行了对比分析,结果表明此时二者的差异可忽略不计。模型的底面竖向固定。

1.4 阻尼设置

本文依然采用常用的瑞利阻尼模型,通过2个特征频率及固定的阻尼比ξ,利用下式计算2个锐利阻尼系数:

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2\xi}{\omega_1 + \omega_2}, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2}, \quad (2)$$

式中,ξ为阻尼比,一般按照经验或规范取值,ω₁和ω₂为2个特征频率,文献[8]详细讨论了这2个特征频率的取值,本文分别取体系的基频(表1)与输入地震波的主频(1.5 Hz)。

但在早期的ANSYS软件的计算分析中,瑞利阻尼模型只能针对所计算的模型整体设置一个固定的阻尼比,而最新的14.0版本中,可针对不同的材料设置不同的阻尼比,因而本文将钢筋混凝土和土体的阻尼比分别设为0.05和0.2^[9]。

1.5 土-结构相互作用的考虑

本文拟在土-结构相互作用面之间设置接触面单元以考虑土与结构的相互作用。对于接触面单元,详细信息可参见ANSYS帮助文件,这里仅交代比较重要的两点:①接触算法选用罚函数法,该方法采用接触弹簧建立目标面和接触面之间的关系,默认的弹簧刚度值(接触刚度)由系统根据单元尺寸及刚度等因素确定,也可人为指定;②接触面模型选用标准型(standard),该模型可考虑土与结构之间的摩擦和滑移以及脱离,可充分模拟土-结构的相互作用。所采用单元分别为2D的Target169单元和2D的Conta172

单元。

1.6 输入地震波

本次输入地震波选取为常用的 El 波, 将其幅值调整到该地区的抗震设防等级对应的幅值 $0.2g$ (g 为重力加速度)。其时程曲线及傅氏谱如图 2 所示。

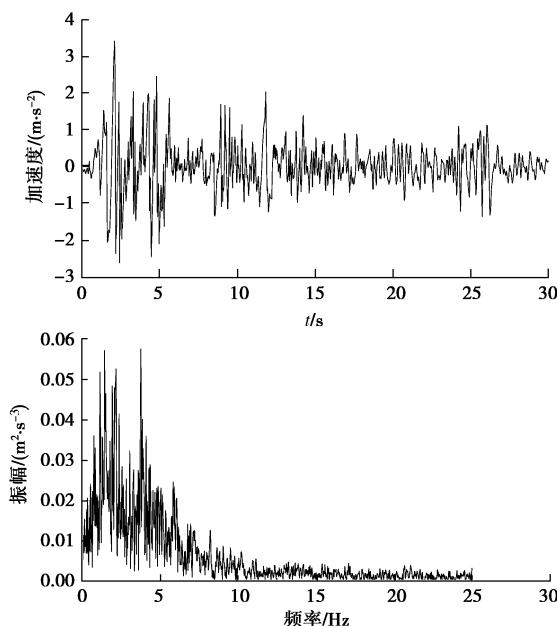


图 2 输入地震波时程曲线及频谱曲线

Fig. 2 Time-history and spectral curves of input seismic wave

2 计算结果

2.1 模态分析

表 1 为 4 种工况时整个相互作用体系的前 5 阶自振频率计算结果, 由表 1 可见:

(1) 对于自由场模型, 依据简单的经验公式 $T=4H/V$ (其中 H 为土层深度 60 m, V 为土体中剪切波速为 200 m/s), 有 $T=1.2$ s, 则基频 $f=1/T=5/6$ Hz, 数值计算结果与理论值完全吻合。

(2) 隧道的存在对体系频率的影响十分有限, 主要是隧道受限于周围的土体, 同时隧道衬砌的质量与挖去的土体质量相当 (自由场模型时为 6.48×10^7 kg, 土 - 隧道模型时为 6.47×10^7 kg)。

表 1 4 种模型时体系的前 5 阶自振频率

Table 1 First 5-order natural frequencies for four models (Hz)

模型	1	2	3	4	5
自由场模型	0.83333	0.88901	1.0342	1.2245	1.4119
土 - 隧道 模型	0.83428	0.88859	1.0365	1.2224	1.4139
土 - 框架 结构模型	0.50258	0.83335	0.88901	1.034	1.2243
隧道 - 土 - 框架结构 模型	0.50314	0.83429	0.8886	1.0364	1.2223

(3) 地表框架结构的存在显著降低了体系的基频。这主要是对于自由场模型和土体 - 隧道模型而言, 一阶振型均是土体的横向振动 (图 3 (a), 3 (b)), 而对于土 - 框架结构模型和隧道 - 土体 - 框架结构模型而言, 一阶振型为框架结构的横向变形 (图 3 (c), 3 (e)), 二阶振型才是土体的横向振动 (图 3 (d), 3 (f))。

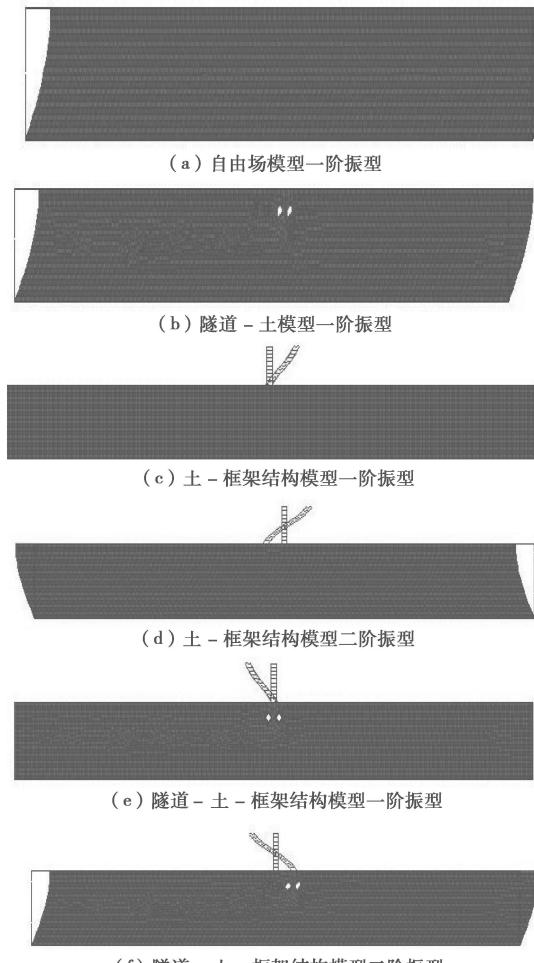


图 3 4 种工况时的体系的一阶和二阶振型

Fig. 3 First-and second-order vibration shapes of four cases

2.2 瞬态分析

(1) 土体表面加速度幅值变化

图 4 为 4 种工况时土体表面各节点加速度幅值沿宽度方向的变化, 其中原点 O 点位于两隧道中心线之间 (也是框架结构底板的中点)。由图 4 可见:

a) 在本文考虑的情况下, 土 - 隧道模型时地表的加速度幅值稍大于自由场情形时, 可见隧道结构的存在并未起到一定的隔震作用。

b) 由于地表框架结构的存在, 土 - 框架结构和隧道 - 土 - 框架结构模型中地表原点的加速度幅值显著增加, 但在结构基础底板范围之外则迅速减小。

c) 对于土 - 隧道模型和隧道 - 土 - 框架结构模型

而言, 在 9~45 m 之间有一个加速度增大的区域 ($1.5D \sim 7.5D$, D 为隧道圆心间距 12 m), 体现了隧道对土体加速度的影响, 而相比于土层 - 地下结构体系, 地下结构 - 土层 - 地面结构体系中的地面结构增大了体系中惯性效应, 使后一体系的基频小于前一体系的基频, 该工况时地表加速度在该区域则呈缩小的趋势。

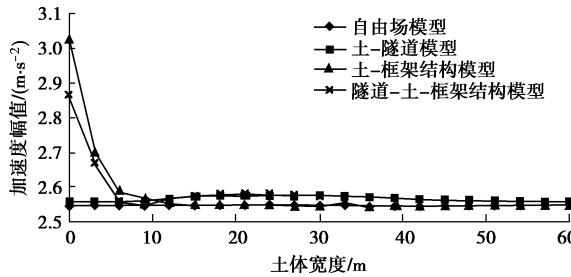


图 4 4 种工况时地表加速度幅值变化曲线

Fig. 4 Curves of acceleration amplitudes of nodes on soil surface

(2) 隧道对框架结构地震响应的影响

图 5,6 分别是框架结构顶层节点的水平位移和水平加速度时程曲线, 由图 5,6 可见: 隧道的存在一定程度上放大了框架结构的变形和加速度, 也即放大了框架结构的地震响应, 但由于隧道直径较小、间距较大以及埋深较深等因素, 使得该影响较小。

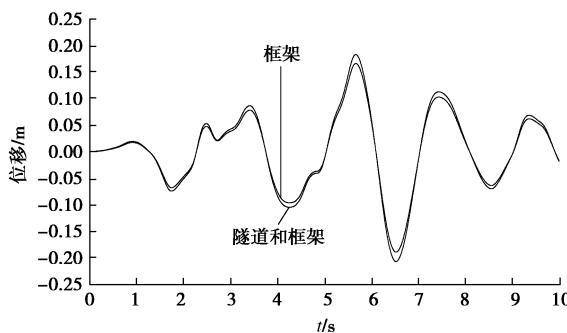


图 5 框架结构顶层节点水平位移时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of horizontal displacement of node at top layer of frame structures

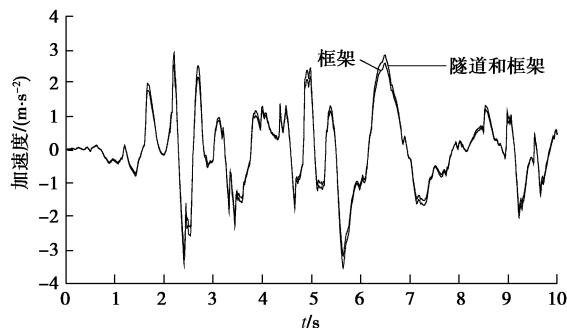


图 6 框架结构顶层节点水平加速度时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of horizontal acceleration of node at top layer of frame structures

(3) 框架结构对隧道地震响应的影响

图 7 为隧道拱顶相对于拱底的水平相对位移变化曲线, 图 8 为隧道拱顶节点加速度时程曲线。由图 7, 8 可见: 地表框架结构的存在对隧道的变形和加速度的影响很小, 完全可忽略不计。

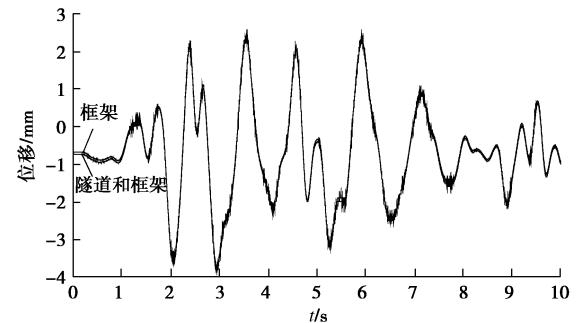


图 7 隧道拱顶拱底相对水平位移时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of relative horizontal displacement between tunnel vault and bottom

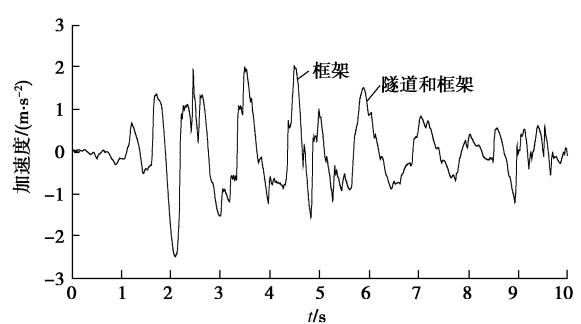


图 8 隧道拱顶水平加速度时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of horizontal acceleration at tunnel vault

3 结 论

本文结合某实际穿越工程, 计算分析了盾构隧道 - 土体 - 地表邻近框架结构相互作用复杂体系的地震响应, 分析了隧道与框架结构之间的相互影响, 可初步得到如下结论:

(1) 隧道的存在对体系频率特性影响不大, 但框架结构的存在一方面显著影响体系的频率特性, 同时也影响体系的振型分布特性。

(2) 由于隧道直径较小的缘故, 隧道对框架结构的加速度和变形有一定的影响, 但该影响程度较小。

(3) 框架结构的存在对隧道的变形和加速度影响很小, 可忽略不计。

由于隧道 - 土体 - 地表结构是一个十分复杂的相互作用体系, 影响该体系地震响应的因素过多, 本文的计算分析仅仅是针对某具体工程的一个计算分析, 结论的一般性仍需通过大量的参数分析 (如隧道半径

和埋深、土体剪切波速与分层分布、地表结构类型和高宽比、地表结构与隧道的相对位置、地震波幅值、类型和入射方向等参数) 进一步探讨。

参考文献:

- [1] 梁建文, 张 浩, VINCENT W L. 地下洞室群对地面运动的影响[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(2): 106 – 114. (LIANG Jian-wen, ZHANG Hao, VINCENT W L. Effect of underground group cavities on ground surface motion[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, **38**(2): 106 – 114. (in Chinese))
- [2] 何 伟. 地下结构地震响应及其与地表建筑的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (HE Wei. Research on seismic response of underground structures and its interaction with ground building[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [3] 李方杰. 邻近建筑对地铁结构地震反应的影响研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2009. (LI Fang-jie. Influence of nearby ground building on seismic response of subway structure[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2009. (in Chinese)))
- [4] 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. (CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang, XU Ye. A study on influence of excavated shallow tunnel on design parameters of ground motion in the soft site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(6): 739 – 744. (in Chinese)))
- [5] 徐炳伟. 大型复杂结构 - 桩 - 土振动台模型试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. (XU Bing-wei. Shaking table test studying large-scale soil-pile-complex structure interaction[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)))
- [6] 楼梦麟, 潘旦光, 范立础. 土层地震反应分析中侧向人工边界的影响[J]. 同济大学学报, 2003, **31**(7): 757 – 761. (LOU Meng-lin, PAN Dan-guang, FAN Li-chu. Effect of vertical artificial boundary on seismic response of soil layer[J]. Journal of Tongji University, 2003, **31**(7): 757 – 761. (in Chinese))
- [7] 刘晶波, 吕彦东. 结构 - 地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998, **31**(3): 55 – 64. (LIU Jing-bo, LU Yan-dong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, **31**(3): 55 – 64. (in Chinese))
- [8] 邹德高, 徐 斌, 孔宪京. 瑞利阻尼系数确定方法对高土石坝地震反应的影响研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(3): 797 – 803. (ZOU De-gao, XU Bin, KONG Xian-jing. Study of influence of different methods for calculating Rayleigh damping coefficient on high earth-rock dam seismic response[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 797 – 803. (in Chinese))
- [9] 胡聿贤. 地震工程学 [M]. 北京: 地震出版社, 1998. (HU Yu-xian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 1998. (in Chinese))