

考虑隧道间相互作用的黄浦江 打浦路隧道抗震性能研究

吕政权¹, 任青¹, 韩东晓², 段创峰³

(1. 上海理工大学 土木工程系, 上海 200093; 2. 上海房屋工程建设技术发展有限公司, 上海 200051; 3. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200233)

摘要: 在传统有限单元法中引入了粘弹性边界, 建立了隧道动力时程分析模型。通过与离心振动台模型试验进行对比, 验证了本方法的合理性。然后, 建立了隧道结构的三维有限元动力分析模型, 研究了在地震荷载作用下, 复线隧道和既有隧道之间的动力相互作用, 重点分析了施工加固措施、净化设备的安装、隧道管片变形缝等因素对于复线隧道抗震性能的影响, 结果表明: 隧道间的相互作用随间距的增大而降低, 施工加固措施明显降低了结构的动力响应, 净化设备对隧道结构地震响应无明显影响。

关键词: 隧道; 有限元; 施工加固; 动力响应

中图分类号: TV312 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2013)05-0096-05

Study on seismic performance of tunnel on Dapu road of Huangpu river considering interaction between tunnels

LÜ Zhengquan¹, REN Qing¹, HAN Dongxiao², DUAN Chuangfeng³

(1. Department of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Building Engineering Technology Development Co., Ltd., Shanghai 200051, China;
3. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: This paper set up a finite element model for tunnel structures by introducing visco-elastic boundary. Through comparing the obtained result with that of centrifuge shaking table model test, the rationality of this method was verified. Moreover, a three-dimensional finite element dynamic tunnel structure model was used to study dynamic interaction of double line tunnel and existing tunnel under seismic load. More attention was paid to the influence of construction reinforcement measures, the installation of purification equipment and deformation joint of tunnel segments on seismic performance of a double-track tunnel. It can be concluded that the interaction between tunnels decreases with the increase of space; construction reinforcement measures evidently reduce the dynamic response of tunnel structure; purification equipment has no clear impact on earthquake response of tunnel structure.

Key words: tunnel; finite element; construction reinforcement; dynamic response

1 研究背景

随着城市化进程的加快, 大量复线隧道的出现给隧道工程的抗震问题带来了新的挑战, 无论是从承载力问题还是抗震性能角度出发, 都需要进行新的评估。

复线隧道工程不仅改变了既有隧道周围的地质构造, 更改变了地震波的传播途径, 复线隧道的建设使得隧道结构的动力性能更加复杂。目前, 关于隧道

抗震常见的分析方法主要有: 波动方程法^[1]、简化算法^[2]和数值方法(有限单元法^[3-6]、边界单元法^[7]和混杂法^[8])。其中, 有限元作为一种成熟的计算方法, 不仅适用于复杂的几何外形, 而且具有较高的计算精度。因此, 在工程中得到了广泛的应用。方勇等(2007)^[3]采用三维有限元方法对平行盾构隧道施工进行模拟, 分析新隧道动态掘进时既有隧道位移、变形和内力的变化规律。高丽等(2007)^[4]利用 ANSYS 研究了不同间距对两相邻黄土公路隧道地震反应的

收稿日期: 2013-05-03; 修回日期: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目“考虑土体循环弱化影响的群桩动力非线性研究”(51008194)

作者简介: 吕政权(1983-), 男, 河南南阳人, 在读硕士, 主要研究方向为土动力学和土-结构共同作用。

影响规律。屈建军等(2008)^[5]采用有限元软件分析了地震情况下隧道的稳定情况以及变形规律。王国波等(2009)^[6]建立了软土地铁车站结构及相邻隧道的三维有限元计算模型,研究了地震荷载作用下结构的薄弱部位及结构内力的变化规律。

但是,由于人工截断边界所带来的反射波严重的降低了计算精度,而采用放大计算边界的方式会大大降低计算效率。因此,本文采用粘弹性边界的有限单元法,建立了隧道结构的抗震分析模型,计算模型与离心机试验结果进行了对比;通过对打浦路复线隧道的抗震性能分析,研究了复线隧道和既有隧道之间的动力相互作用,通过对于不同的加固方案抗震性能的对比研究,为工程抗震设计提供了参考。

2 基于粘弹性边界的有限元计算方法

2.1 基于粘弹性边界的有限元计算模型

有限元模拟波动问题,必须解决好(高频)滤波效应和边界条件这两个方面的问题,处理结果的好坏将直接决定计算结果的精度。

(1) 滤波效应。滤波效应是指高频波(短波)在有限元网格传播时,由于网格尺寸过大而不能通过,造成计算结果的失真,因此网格尺寸必须满足:

$$h_{\max} = \chi \lambda_{\min} \quad (1)$$

式中: $\lambda_{\min} = V_R / f_{\max}$, λ_{\min} 为最小波长; f_{\max} 为截取的最大波动频率; V_R 为瑞利波速; χ 是一个与单元类型及计算方法有关的量^[9]。

(2) 粘 - 弹性人工边界。由于在有限元建模中所采用的人工截断方式会造成入射波在边界处形成反射,从而形成次生振源,严重影响计算精度。在此,引入粘弹性人工边界^[10]。其具体的施加方式为在边界 r_b 处设置并联的弹簧 k_x 及阻尼器 c_x ,其具体表达式如下:

$$k_x = G/2r_b \quad (2)$$

$$c_x = \rho V_s \quad (3)$$

2.2 动力分析方法的试验验证

黄茂松等^[11]进行了离心机振动台试验,研究了水平地震作用下圆形隧道的动力响应。隧道模型为铝合金圆筒,外径 160 mm,内径 143 mm,长度 380 mm。模型箱中均布砂土。通过布置在隧道模型外壁上的 8 个应变监测点记录结构应变,试验布置如图 1。

在此,将离心试验的隧道模型尺寸还原成原型尺寸,建立隧道结构的二维有限元模型。土层计算深度取隧道外径的 2.56 倍(为 22.5 m),横向计算宽度为隧道外径的 25 倍(200 m),隧道埋深 7.5 m。模型两

侧边界施加粘弹性人工边界,底部边界取为固定边界。输入地震波为加州波,峰值加速度 0.1 g,计算步长为 0.001 s。土体选取为砂土,土体及隧道结构的物理力学参数见表 1。隧道结构二维有限元模型及输入地震波加速度时程曲线如图 2、图 3。

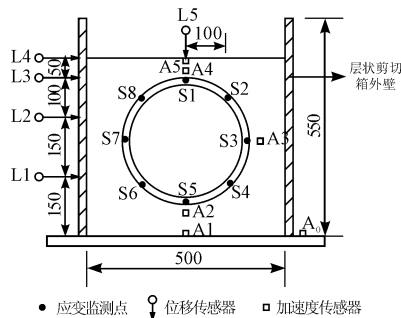


图 1 离心模型试验仪器布置图(单位:m)

表 1 土体及隧道结构物理力学参数

名称	厚度	密度	泊松比	剪切波速	弹性模量
砂土	22.5	1.6×10^3	0.36	150	35.322
混凝土	0.55	2.5×10^3	0.18	2058.5	2.5×10^4

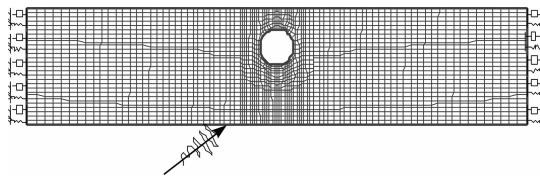


图 2 隧道结构二维有限元模型

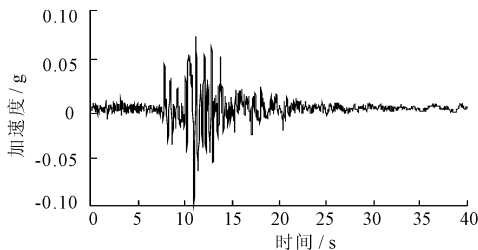


图 3 El Centro 波加速度时程曲线

表 2 为二维有限元计算结果与离心机模型试验之间的对比。由表 2 可以看出:二维有限元计算结果与离心机模型试验结果之间的最大误差为 9.66%,对于地下结构的动力分析^[11],可以认为二者结果大致一致。另外,将二维有限元计算得到的最大内力值换算为应变最大值为 $17.73 \mu\epsilon$,与离心机试验得到的最大应变 $17.56 \mu\epsilon$ 相差极少。因此,无论是从内力还是从应变角度来看,二维有限元计算结果与离心机模型试验结果是一致的。

表2 二维有限元计算结果与离心机试验结果对比

项目	kN, kN · m, %			
	轴力		弯矩	
	极小值	极大值	极小值	极大值
离心机试验	-27.096	27.906	-29.184	28.562
二维有限元	-29.568	29.568	-31.320	31.320
二者误差	9.123	5.956	7.32	9.660

综上所述,采用粘弹性边界条件的有限元模型计算参数选取合理,能正确的反映隧道结构在地震荷载作用下的真实响应,可以用于分析地下隧道结构的地震响应问题。

3 工程概况

上海黄浦江打浦路复线工程位于卢浦大桥和既有打浦路隧道以西,途经世博园区,长约3 km,单向两车道,行车方向为浦西至浦东(如图4所示)。复线隧道浦东明挖段与既有隧道水平间距为最近处不到10 m,两者的动力相互作用十分显著。

此外,复线隧道在浦东段与既有隧道共用一个排风塔,其为带顶盖侧面出风的钢筋混凝土结构风塔,地面尺寸为10.8 m × 5.3 m,出风口底面距地面为20 m。在排风塔处两隧道水平间距仅为3 m,且排风塔与两侧隧道通过柔性排风道连接,其抗震性



图4 打浦路隧道平面示意图

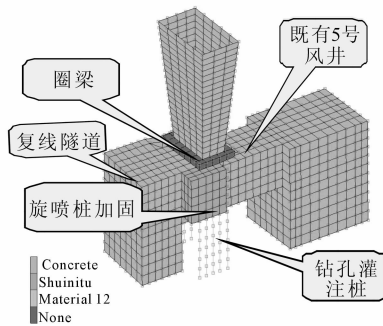


图5 风塔局部加固措施

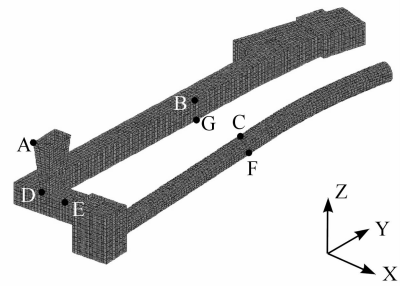


图6 计算模型及计算参考点选取示意图

4.1.2 计算参数选取 隧道、风塔、地下连续墙等结构为混凝土结构,土层及相关具体材料参数列于如表3。

4.1.3 地震波的选取 根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[12],上海的抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度值为0.1 g。

为了保证在模型中的土层底部输入地震波传递到地表时,地表加速度峰值达到0.1 g。采用SHAKE程序对峰值调整为0.1 g的上海人工地震波中波进行加速度反演到土层底部,作为输入波。为了验证此方法的可靠性,再将得到的土层底部加速度时程曲线正演到地表与上海人工地震波中波加

能受到了较大的考验。为此,施工中采取了如下加固措施(图5):①风塔基础采用 $\phi 600$ 钻孔灌注桩加固;②风塔地基土采用旋喷桩地层加固;③风塔底部圈梁结构。本次研究的目的是研究水平地震荷载作用下,复线隧道和既有隧道之间的动力相互作用,以及通风净化设备的安装和不同的加固方案对于隧道抗震性能的影响。

4 隧道结构抗震三维有限元分析

4.1 计算模型及参数选取

4.1.1 计算模型 由第2节的讨论可知:采用粘弹性边界条件的有限元模型能够用于分析地下隧道结构的地震响应。采用通用有限元软件对隧道结构建立三维有限元模型。模型长280 m,宽70 m,深17.63 m。模型土体采用实体单元,隧道和风井结构采用板壳单元,总体计算规模约240万个自由度。同时,土体两侧设置了粘弹性边界,土体计算深度60 m。

在对隧道结构进行抗震分析时,分别在风塔顶部(A点)、风塔底部(D点)、风道变形缝(E点)、复线隧道中间截面的顶部(B点)和底部(G点)、既有隧道中间截面的顶部(C点)和底部(F点)以及地表点(H点)处选取计算参考点,具体模型如图6。

速度时程曲线进行对比,对比情况如图7所示,可以看出二者吻合度较好,本加载方法是正确的。

4.1.4 隧道管片接缝及净化设备的处理方式 根据工程实际情况,管片接头不允许发生平面内的错动,仅允许发生垂直于平面的小幅度位移。模型中采用弹簧连接(弹簧刚度无穷大)的方式,限制其平面内的运动,但允许应力传递,垂直面上自由度释放,允许产生一定的位移。另外,在建立模型时,将净化设备简化为质量元,按照净化设备平面位置加到隧道模型中。

表 3 土层及隧道的物理力学参数 $m, kN/m^3, MPa$

土层	厚度	容重	泊松比	弹性模量	阻尼比
1	3.0	18.30	0.40	62.86	0.01
2	2.0	18.30	0.40	53.28	0.01
3	4.0	17.40	0.45	91.13	0.01
4	8.0	16.60	0.45	101.47	0.01
5-1	2.0	17.90	0.40	124.76	0.01
5-2	10.0	18.00	0.36	147.80	0.01
5-3	6.0	17.90	0.40	178.07	0.01
5-33	11.0	17.90	0.40	200.68	0.01
5-4	2.0	19.40	0.40	362.11	0.01
7	12.0	19.24	0.33	579.78	0.01
混凝土		25.0	0.167	21000.0	

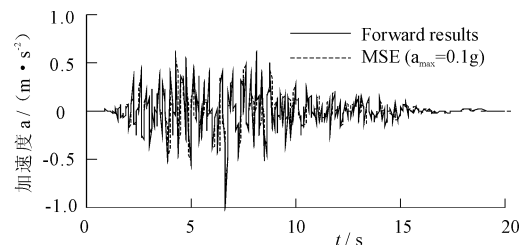


图 7 SHAKE 程序反演 - 正演地表加速度时程曲线对比

4.2 模态分析

对隧道结构进行前 10 阶振型模态分析,自振频率如表 4 所示。其中,前两阶振型以平动为主,自振频率均在 0.89 Hz 左右。因此,主要研究隧道结构在地震作用下的水平动力响应。

表 4 隧道结构模态 Hz

振型	频率	振型	频率
一阶	0.8903	六阶	0.9891
二阶	0.8912	七阶	1.0090
三阶	0.8977	八阶	1.0300
四阶	0.9361	九阶	1.0430
五阶	0.9788	十阶	1.0430

4.3 计算结果分析

4.3.1 加固措施的影响 表 5、6 分别为加固前后的隧道结构关键点的动力响应位移、加速度峰值及隧道结构最大正应力值。

由以上图表可以看出:

(1)隧道结构在设防烈度为 7 度的情况下的水平位移及加速度峰值随着位置的升高而增大。其中,风塔顶部在地震作用下的位移及加速度响应最大,地表点加速度为 $0.98 m/s^2$,与《建筑抗震设计规范》规定的上海地区 $0.10 g$ 的设计基本加速度值大致相等。

(2)采取施工加固措施后,风塔结构水平位移及加速度峰值降低幅度最显著。

表 5 加固前后隧道结构动力响应峰值对比 $m, m/s^2$

点位	加固前		加固后	
	位移	加速度	位移	加速度
A	0.0183	2.97	0.0178	2.90
B	0.0092	1.66	0.0092	1.66
C	0.0079	1.02	0.0080	1.01
D	0.0072	0.98	0.0073	0.96
E	0.0069	0.84	0.0070	0.82
F	0.0059	0.89	0.0060	0.89
G	0.0076	0.77	0.0077	0.77
H	0.0057	0.98	0.0061	0.98

表 6 加固前后隧道结构最大正应力 MPa

工况		σ_{xmax}	σ_{ymax}	σ_{zmax}
		加固前	拉 2.501	1.114
	压 -0.353	-0.701	-0.023	
加固后	拉 2.318	1.058	0.021	
	压 -0.345	-0.673	-0.023	

(3)采取施工加固措施后,隧道结构模型选取计算点的水平位移及加速度峰值变化不大,隧道结构最大正应力也出现少许降低。

隧道结构在 7.22 s 时,位移及加速度达到峰值,故提取 7.22 s 时隧道结构的 x 方向正应力云图进行分析(图 8、图 9)。由图 8、图 9 知:①既有隧道最大应变分布在 45° 方向,这与黄茂松^[11]试验结果相吻合;②风塔根部为 x 方向最大正应力有了明显降低,降低量超过 7%,说明加固措施对于降低结构的应力响应水平有明显的作。

4.3.2 隧道通风净化设备的影响 复线隧道建成后,在复线隧道暗埋段安装了通风净化设备。在对隧道结构建立模型时,将隧道通风净化设备以质量元的方式加到复线隧道暗埋段处。净化设备安装后,隧道结构净化设备区 X 方向正应力云图如图 10。

隧道净化设备区 X 方向最大应力分别为 0.807 MPa 与 0.804 MPa,远小于强度等级为 C20 混凝土的轴心抗压强度 1.54 MPa。可见,隧道通风净化设备的安装对隧道结构的抗震性能影响不大。

4.3.3 复线隧道、风塔和既有隧道的动力相互作用

复线隧道与既有隧道在风塔处间距最小为 3m,随着两隧道间距的增大,复线隧道及既有隧道的加速度位移峰值差值如表 7 所示。由表 7 可知,两隧道的位移及加速度峰值的差值随着隧道间距的增大而减小,其中在风井通道连接处附近,两隧道的位移

及加速度峰值的差值最大。从体量上看,复线隧道远大于既有隧道,在水平地震波作用下,复线隧道如同一个屏障遮蔽了入射波,降低了其对于既有隧道

的影响,但是随着间距的加大,这种遮蔽效应在降低,接近于两个相对独立的单体,所以地震响应在同高处比较接近。

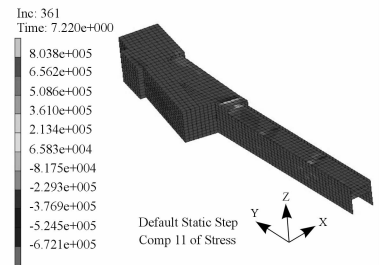
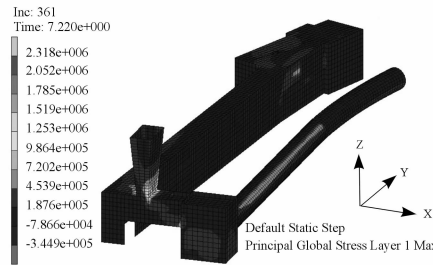
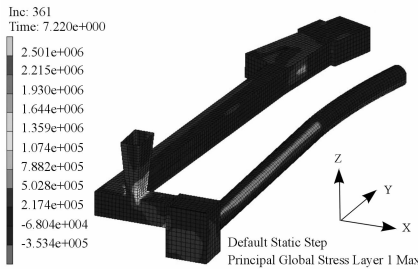


图8 加固前隧道结构 x 方向正应力云图 图9 加固后隧道结构 x 方向正应力云图 图10 加固后隧道通风净化设备区图

表7 两隧道加速度位移峰值随间距变化情况 $m, m/s^2$

隧道间距	既有隧道		复线隧道		差值	
	加速度	位移	加速度	位移	加速度	位移
3.0	1.37	0.0089	2.18	0.0131	0.81	0.0042
3.3	1.12	0.0073	2.00	0.0128	0.88	0.0055
4.2	1.01	0.0077	1.64	0.0104	0.63	0.0027
4.4	1.03	0.0081	1.67	0.0093	0.64	0.0012
5.7	1.26	0.0081	1.74	0.0099	0.48	0.0018
7.0	1.37	0.0091	1.33	0.0101	0.04	0.0010

5 结语

本文采用有限元方法分析了在地震作用下复线隧道与既有隧道之间的相互作用,重点考虑了风塔加固措施、净化设备的安装及隧道管片变形缝对隧道结构抗震性能的影响,得出了以下几点结论:

(1) 利用二维整体有限元模拟隧道结构得出的隧道内力分布规律与离心振动模型试验结果相一致,说明有限元方法能够用于分析地下隧道结构在地震荷载作用下的响应。

(2) 通过建立三维有限元模型对隧道结构在抗震设防烈度为7度情况下进行分析,结果表明隧道结构水平加速度和位移峰值随位置的升高而增大,风塔顶部地震响应最为强烈。风塔加固措施减小了风塔局部应力集中,显著地降低了结构的动力响应,这对于保护隧道的安全运营起到较明显的作用。

(3) 隧道通风净化设备的安装对隧道结构地震响应无明显影响。

(4) 隧道间距对两隧道的相互作用有着较为明显的影响,在风塔处,隧道间距最小,两隧道及风塔的地震响应较为强烈。

参考文献:

- [1] Davis C A, Lee V W, Bardet J P. Transverse response of underground cavities and pipes to incident SV waves[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2001, 30(3):383-410.
- [2] 余行,黄茂松,曹杰. 隧道结构的简化抗震计算方法——等代水平地震加速度法[J]. 铁道勘测与设计, 2010, 54(5):57-61.
- [3] 方勇,何川. 平行盾构隧道施工对既有隧道影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(7):1402-1406.
- [4] 高丽,高峰. 不同间距对两相邻黄土公路隧道地震反应的影响[J]. 石河子大学学报, 2007, 25(6):766-768.
- [5] 屈建军,曾娟,朱婷,等. 隧道断面地震反应分析[J]. 三峡大学学报, 2008, 30(6):57-59+80.
- [6] 王国波,马险峰,杨林德. 软土地铁车站结构及隧道的三维地震响应分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8):2523-2528.
- [7] Kattis S E, Beskos D E, Cheng A H D. 2D dynamic response of unlined and lined tunnels in poroelastic soil to harmonic body waves[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(1):97-110.
- [8] 邓芃,都浩,刘艳. 基于耦合模型的地下隧道抗震分析研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(3):363-366.
- [9] Valliappan S, Murti V. Finite element constraints in the analysis of wave propagation problems[R]. Sydney: University of New South Wales, 1984.
- [10] Lysmer J, Kulemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1969, 95(4):859-878.
- [11] 黄茂松,曹杰. 隧道地震响应简化分析与动力离心试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2):271-280.
- [12] 中国建筑科学研究院. GB50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.