

文章编号:1006-2106(2008)05-0020-03

萧甬铁路屏蔽工程结构抗震分析*

李涛**

(中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

摘要:研究目的:对我国第一座铁路屏蔽工程结构进行地震反应分析,建立结构有限元模型并计算动力特征;采用反应谱法分析不同基础约束条件、顶层覆土厚度对地震反应的影响作用,取得的结果直接指导工程设计和施工。

研究结论:水平地震作用时,整体结构出现显著的地震效应,对结构设计有较大影响;可采用边孔顶板斜置的方法,减少覆土厚度,提高结构抗震能力。

关键词:结构设计;有限元分析;动力特性;反应谱

中图分类号:U211.9 **文献标识码:**A

Analysis of Seismic Resistance of Didang Xincheng Shielding Structure in Shaoxing on Xiaoshan - Ningbo Railway

LI Tao

(China Railway Shanghai Design Group Co. Ltd, Shanghai 200070, China)

Abstract: Research purposes: The analysis of seismic response of the first railway shielding structure in China is made and the finite element model is established for the shielding structure to calculate the dynamic characteristic. By the response spectrum method, the seismic responses under different foundation and thickness of the top soil are analyzed for the purpose of guiding engineering design and construction.

Research conclusions: (1) When horizontal earthquake happens, the integral structure will show notable seismic effect which should be taken into account in structure design. (2) The weight of the soil on the top of sideward opening of structure is the main reason for creating seismic effect, so it is necessary to reduce it by tilting the top plate in the sideward opening to enhance the capacity of seismic resistance.

Key words: structure design; finite element analysis; dynamic characteristics; response spectrum

浙江绍兴市迪荡新城位于该市东北角,总地面积 5.75 km²。其南侧为新城商贸区,北侧为迪荡湖城市公园,由于目前萧甬铁路从城中东西穿过,将迪荡新城分割为 2 块。为了提升迪荡新城形象,将南北 2 个区域有机地连成一片,形成城中有湖、湖中有城的整体区域,提升使用价值,经上级主管部门批准,拟对穿越新城的萧甬铁路实施屏蔽措施,即采用框架结构将铁路工程完全屏蔽隔离,外部进行绿化覆盖,在保证列车安

全运营的前提下,满足有效隔离铁路对商贸和居住区所带来的噪声和震动影响,进一步改善生态和居住环境的要求。

本项目系我国第一座隔离铁路噪音、连同分割区域、提升城市形象、改善生态环境的铁路屏蔽工程,由中铁上海设计院设计。该工程沿铁路线路长度 699 m,总投资约 2 亿元,项目实施中的科研、设计和施工经验和理念将为今后解决类似问题、进一步改善我国城市

* 收稿日期:2008-02-19

** 作者简介:李涛,1957 年出生,男,教授级高级工程师,中铁上海设计院集团有限公司副总工程师。

环境和功能起到重要的示范作用。由于屏蔽工程结构在我国铁路工程中尚未有先例,因此,在设计中必须高度重视结构的安全性和可靠性,其中,研究结构抗震性能是设计工作的重要内容。

1 工程概况

本工程地处杭州湾南缘,场地范围内地形平坦开阔,地貌单元属萧一绍海湾~湖沼相沉积平原。地基土由第四系海湾~湖沼相松散沉积层及下卧侏罗系中上统英安玢岩组成。据勘探揭露,地表下深度50.0 m内地层主要由黏性土、砂性土及基岩组成。

经比选,工程结构设计断面采用3孔品字形刚构,结构中孔净跨度13 m,边孔净跨度6 m,现浇施工。整体结构具有刚度大、稳定性好、空间利用率高、易于施工等优点。中孔内列车限界高为7.70 m。边孔净高5.4 m。断面结构主要尺寸为:中孔顶板厚80 cm,边孔顶板厚60 cm,内立柱厚100 cm,外立柱厚80 cm,其中,内立柱下半段采用开洞形式。下部为桩基础,承台厚200 cm,采用φ80 cm 钻孔灌注桩,桩长38~43 m,桩基持力层进入⑨层英安玢岩。结构外侧整体覆土,植被绿化,边坡采用1:1.5。图1为屏蔽工程结构断面示意。

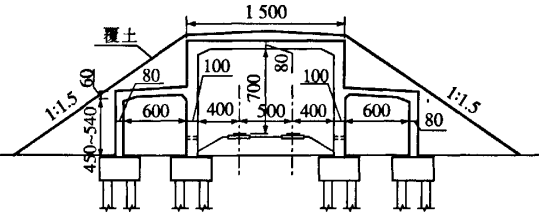


图1 屏蔽工程结构横断面示意图(单位:cm)

本工程所属区域位于抗震设防烈度6度区,地震动峰值加速度值为0.05g。但由于本覆盖工程沿铁路线路较长,铁路完全被封闭,地震时一旦结构失效倒塌,将对列车和人员的生命安全造成严重威胁,属于重点抗震工程。按照《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)的规定要求,应按7度考虑抗震措施。设计时还对结构进行了地震反应分析,用计算结果指导设计。

2 计算模型

抗震分析采用有限元法,根据屏蔽工程结构沿线路基本无变化的特点,采用平面变形假定。应用国际通用的大型结构分析软件SAP2000计算,品字型刚构采用厚板单元^[1]。由于下部结构为桩基础,因此基础的转动和水平变位对上部结构的内力计算数值有较大

影响。按照《铁路工程抗震设计规范》的规定,地基的约束作用可采用水平和扭转2个方向的理想约束弹簧 K_{11} 、 K_{22} 来模拟^[2-3],本文采用桩基“m法”计算^[4],则上述系数表达式为:

$$K_{11} = n\rho_2 \tag{1}$$

$$K_{22} = 4\rho_4 + \rho_1 \sum_i X_i^2 \tag{2}$$

式中 K_{11} ——结构承台产生单位水平位移所需的水平力;
 K_{22} ——结构承台产生单位转角所需的力矩;
 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_4 ——分别为单位轴向位移、单位横向位移及单位转角所引起的桩头相应内力;

X_i ——桩距;

n ——桩数。

根据计算, $K_{11} = 18\,000\text{ kN/m}$, $K_{22} = 140\,000\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ 。计算时还分别考虑了按上述弹簧约束、以及不考虑约束的刚性固结2种情况,对其计算结果进行比较分析。

计算动力反应时,除了考虑品字形刚构的自身质量外,还计入了边孔顶部覆土的质量;对于边孔两侧的堆土作用,鉴于其呈倒三角形堆积,上部土体刚度很小,对结构的侧向约束作用很弱,可偏安全地不计入其影响以简化计算。

3 结构自振特性

以子空间迭代法,分别计算了结构前20阶自由振动周期及相应振型。表1给出了前6阶振动周期,图2~图5为考虑基础弹簧约束时前4阶振型。

表1 前6阶自振周期 (单位:s)

基础约束情况	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
弹簧约束	1.871	0.324	0.117	0.079	0.062	0.046
刚性固结	1.037	0.268	0.094	0.074	0.056	0.041

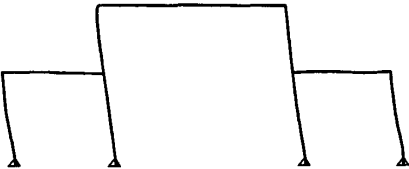


图2 第1振型

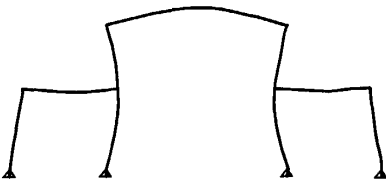


图3 第2振型

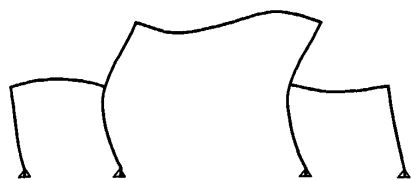


图 4 第 3 振型



图 5 第 4 振型

从计算结果可以看到：

(1) 第 1 振型的振型图为反对称波,表明水平地震力主要由第 1 振型贡献。第 2 振型为正对称波,表明该振型对竖向地震力贡献最大。

(2) 当考虑基础的弹簧约束时,基本自振周期 T_1 比刚性固结时增大 80%,说明基础变形对结构振动特性的影响作用较大。

4 地震反应分析

目前我国铁路工程抗震设计时采用两阶段设计方法以实现三水准设防目标,即在多遇地震下按线弹性方法进行结构的强度和稳定验算,罕遇地震下对结构进行非线性分析。

本文采用反应谱法,按照多遇地震作用,分析 6、7 度地震时沿水平方向结构的地震反应;反应谱场地按特征周期一区、Ⅱ类场地考虑, $T_g=0.35s$,结构阻尼比 $\zeta=0.05$,加速度放大系数 $\beta=2.25 T_g/T$ 。由振型迭加法求解动力方程;基于平稳随机过程理论,采用完全平方组合法(CQC 法)对前 10 阶振型反应进行组合^[5]。计算时分别比较了不计、计入边孔顶覆土质量,边孔顶板斜坡 8.2°(高差 1 m)和 16.1°(高差 2 m)的情况,以分析该覆土质量对水平地震作用的影响。

分别考虑了基础弹性约束和刚性固结 2 种情况,表 2 为基础弹性约束时的计算主要结果,表 3 为内力计算值。图 6 ~ 图 7 给出了 7 度地震时,结构弯矩 M 数值和分布。

通过内力分析,可以得到以下结果和规律：

(1) 水平地震作用时,结构发生了显著的地震效应。例如 7 度地震时,中立柱的最大地震弯矩 M 达

1 065.1 kN · m,超出非地震荷载时 567.2 kN · m 近 1 倍。即使按 6 度地震考虑时,也与非地震荷载内力基本相当。由此可见,地震力为主要的荷载,必须重视。

表 2 7 度地震时主要计算结果(基础弹簧约束)

项 目	覆土质量/t	基本自振周期/s	立柱最大弯矩 $M/(kN \cdot m)$	立柱最大剪力 Q/kN
顶板无覆土	0	0.335	92.1	0.17
顶板斜坡 16.1°	14.3	1.472	775.1	1.02
顶板斜坡 8.2°	19.4	1.596	965.8	1.45
顶板平坡全覆土	26.4	1.871	1 065.1	1.88

表 3 7 度地震时内力计算值比较

基础约束情况	立柱最大弯矩 $M/(kN \cdot m)$	立柱最大剪力 Q/kN
弹簧约束	1 065.1	1.88
刚性固结	1 201.2	3.28

(2) 边孔结构顶部的覆土,是产生地震效应的主要原因。由表 2 看出,边孔采用平坡且覆土最多时,水平地震力比无覆土时增加了 10 倍。因此,减少覆土重量是降低地震作用的最有效办法。当结构顶板采用 16.1°斜坡度时,由于减小了覆土质量 12.1 t,地震力减小了 30%,效果比较明显。鉴于此项分析结果,设计中对边孔平坡顶板进行了优化改进,采用 16.1°坡度的斜坡结构,减小了覆土厚度,不仅明显降低了地震作用,还大大降低了恒载自重。

(3) 考虑基础弹簧约束时,最大地震力发生在立柱中部;不考虑基础变形时最大地震力发生在根部,例如 7 度地震时,前者最大弯矩为 1 065.1 kN · m,后者

(下转第 29 页)

图13为 $f_{\min}=10\text{ Hz}$, ξ_{\min} 分别为0.03和0.2时不同振动频率的材料阻尼系数。当时 $\xi_{\min}=0.03$, 材料阻尼系数在0.01~0.02之间且变化, 当 $\xi_{\min}=0.2$ 时, 材料阻尼系数在0.04~0.06之间且变化。从图中可以看出, Rayleigh 阻尼模型能较好的模拟岩土材料阻尼与频率无关的性质。

对比2种情况可知, 当采用 Rayleigh 阻尼时, 材料阻尼系数随 ξ_{\min} 增大而增大, 但数值并不相同。因此, 在进行数值模拟分析时, 首先要根据现场的材料阻尼系数, 通过试算的方法确定 Rayleigh 阻尼常数。

图14为振动从距离振源10 m处传播到20 m处, 各频率的衰减的分贝数。从图中可以看出, 当频率低于3 Hz时, 有2~4 dB的衰减; 4~5 Hz时, 阻尼比较小的情况下, 振动有放大, 阻尼比较大的情况下, 振动几乎没有衰减; 当频率高于8 Hz时, 振动有大于5 dB的衰减。这一规律与上一章实测结果相符。

4 结论

本文从测试和数值分析两方面出发, 对高架轨道诱发环境振动进行了研究。采用数值计算软件FLAC3D, 建立了台南科技园大地模型, 分析了在简谐点荷载作用下, 大地振动的特性及其衰减规律, 得出以下结论:

(1) 点荷载作用下, 大地的响应与表面波的频散特

性有关, 低频振动衰减速度较慢, 高频振动衰减速度较快, 当激振频率接近大地主频时, 大地振动有放大现象。

(2) 在数值计算当中, Rayleigh 阻尼能较好的模拟大地的阻尼特性, 其参数选取可采用试算的方法确定。

参考文献:

- [1] G. Degrande, G. Lombaert. High-speed train induced free field vibration: in situ measurements and numerical modeling[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 247(11): 131-144.
- [2] Hal Amick. A Frequency-Dependent Soil Propagation Model[R]. Presented at SPIE conference on Current Developments in Vibration Control for Optomechanical Systems Denver, Colorado, 1999.
- [3] Hirokazu Takemiya. Field vibration mitigation by honeycomb WIB for pile foundations of high-speed train viaduct[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2004(24): 68-87.
- [4] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [5] 雷晓燕, 圣小珍. 铁路交通噪声与振动[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [6] GB/T 10071—1988, 城市区域环境振动测量方法[S].
- [7] GB/T 10070—1988, 城市区域环境振动评价标准[S].

(上接第22页)

为1201.2 kN·m, 说明基础变形对内力绝对值的改变不大, 但其发生位置有很大不同。

5 结论

通过对屏蔽工程结构的抗震分析, 可以得到下述结论:

(1) 水平地震作用时, 整体结构出现显著的地震效应, 地震内力有很大的数量级, 对结构设计有较大影响, 是控制因素, 必须加以重视。

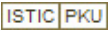
(2) 结构边孔顶部的覆土重量, 是产生地震效应的主要原因。在设计中要设法降低其影响, 可采用边

孔顶板斜置的方法, 减少覆土重量, 提高结构抗震能力。

参考文献:

- [1] 陈世民, 等. SAP2000 结构分析简明教程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [2] GB 50111—2006, 铁路工程抗震设计规范[S].
- [3] TB 10003—2005, 铁路隧道设计规范[S].
- [4] TB 10002.1—2005, 铁路桥涵设计基本规范[S].
- [5] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.

萧甬铁路屏蔽工程结构抗震分析

作者: [李涛, LI Tao](#)
作者单位: [中铁上海设计院集团有限公司, 上海, 200070](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2008 (5)

参考文献(5条)

1. [陈世民](#) [SAP2000结构分析简明教程](#) 2005
2. [GB 50111-2006. 铁路工程抗震设计规范](#)
3. [TB 10003-2005. 铁路隧道设计规范](#)
4. [TB 10002. 1-2005. 铁路桥涵设计基本规范](#)
5. [范立础](#) [桥梁抗震](#) 2001

引用本文格式: [李涛, LI Tao](#) [萧甬铁路屏蔽工程结构抗震分析](#) [期刊论文] - [铁道工程学报](#) 2008 (5)