

重载列车作用下交叠隧道动力响应分析

王翠艳¹， 郭亚娟²， 陈恩利¹

(1 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043; 2 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600)

摘要:以某重载铁路上跨引黄隧洞项目为研究对象,建立了重载货车-轨道模型和隧道-围岩-引黄隧洞有限元模型,提取了精确的横、竖向轮轨力,并提出了简化的加载方式;分析了有无道床橡胶减振垫情况下的隧道结构与引黄隧洞的动力响应。分析结果表明:在平底板底部和侧边施加橡胶垫层后,结构位移变化不大,铁路隧道的加速度衰减量最大为 49.17%,发生在隧道拱顶位置,最大衰减量为 6.8 dB;引黄隧洞交叉断面的最大衰减量为 28.79%,发生在边墙位置,衰减最大为 5 dB。该研究为类似隧道设计提供理论参考。

关键词:重载列车;交叠隧道;减振垫;列车荷载

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)02-0021-06

0 引言

近距离交叠隧道越来越多的出现在轨道交通中,同时,列车重载、提速造成列车振动载荷进一步加大,对隧道周围临近建筑产生的振动影响明显加强,因此对隧道结构的动力性能提出了更高的要求。列车运行对结构及周围土体振动的影响成为工程实际中广泛关注的问题^[1-4]。Yamaguchi 等^[5]根据现场监测资料,分析了盾构法近距离双层隧道施工时的相互影响。白冰^[6]研究了地铁列车振动作用下交叠隧道的三维动力响应。王祥秋等^[7]讨论了隧道衬砌结构动力有限元分析的理论及数值计算方法。

以某重载铁路上跨引黄隧洞项目为研究对象,建立了交叠隧道的三维模型,较真实的反映了列车通过时隧道结构的振动情况。通过货车-轨道模型,提取各车轮的时程竖向、横向轮轨力,为隧道振动分析提供了精确的外激励。通过处理轮轨力时程曲线,实现了在初始位置同时施加所有轮轨力,方便建模分析。最后分析了有无道床橡胶垫情况下,隧道结构与引黄隧洞的动力响应情况,对类似结构的设计具有一定的指导意义。

1 计算模型

列车在穿越引黄隧洞时,振动在传播途径中,经过轨道、隧道结构、岩石传递至引黄隧洞,该系统的振动预测,涉及①列车-轨道动力相互作用系统;②隧道-围岩动力相互作用系统。整体结构复杂,建模困难,分析耗时,对比分析研究表明^[8-10],可取的方法是通过列车-轨道相互作用系统,得到轨道结构作用于隧道仰拱上的动载荷,然后通过隧道-地层动力相互作用系统,预测结构动力响应。

1.1 列车-轨道模型

采用多体动力分析软件 UM 建立 C80 货车模型,并用 SS8 机车牵引。车辆系统采用二系弹簧多刚体、多自由度方式建模。每节车由车体、转向架、轮对等刚体和弹簧-阻尼悬挂装置组成。每个刚体考虑 6 个自由度,每节车共有 42 个自由度。图 1 为货车转向架模型和列车模型。

轨道参数选取翟婉明《车辆-轨道耦合动力学》中的大秦重载铁路轨道基本动力参数^[11]。

1.2 隧道-围岩-隧洞模型

收稿日期:2014-10-10 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2015.02.05

作者简介:王翠艳(1979-),女,讲师,主要从事振动与噪声控制等方面的研究。E-mail: wang_cuiyan@163.com

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11172183)

王翠艳,郭亚娟,陈恩利.重载列车作用下交叠隧道动力响应分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(2):21-26.

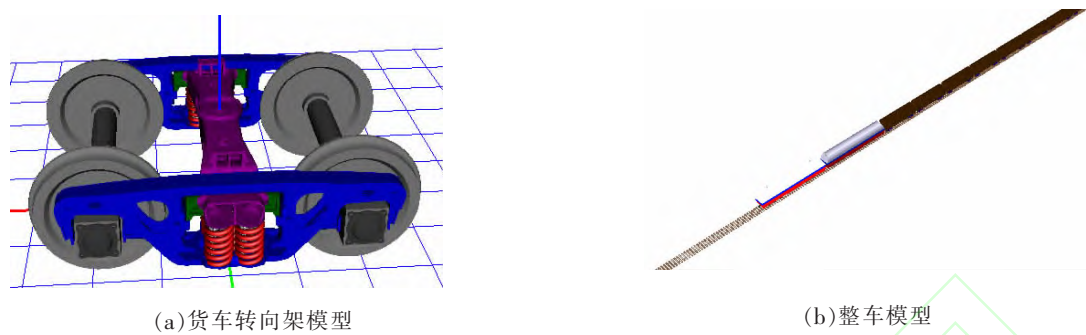


图 1 C80 货车轨道模型

采用 ANSYS 有限元软件进行建模分析,围岩、初衬、二衬均采用实体单元模拟,钢轨、扣件分别采用梁单元和弹簧单元。图 2 为交叠隧道整体有限元模型,图 3 为铁路隧道与引黄隧洞位置关系图。

根据《铁路隧道设计规范》(TB10003—2005)条文说明,锚杆区围岩粘聚力增加 20% 的建议修正锚杆区围岩参数,表 1 为岩石物理力学参数。考虑隧道埋深情况,模型沿铁路隧道方向取 120 m,沿引黄隧洞方向取 80 m,高度方向,引黄隧洞仰拱底向下取 5 m,铁路隧道上方取 20 m,其余覆盖层采用垂直均布压力计算,四周采用法向弹簧约束,底部采用三相粘弹性约束,顶面为自由表面。其中,弹簧单元的弹性系数与阻尼系数按照下式计算

$$\begin{cases} K_b = \alpha \frac{G}{R} \\ C_b = \rho \end{cases} \quad (1)$$

式中, ρ 为岩石的密度; G 为剪切模量; c 为波速,法向边界和切向边界分别取 P 波波速 c_p (m/s) 和 S 波波速 c_s (m/s); R 为波源到人工边界的距离;参数 α 为与边界的方向相关,通常法向 $\alpha = 4$,切向 $\alpha = 2$ 。

隧道衬砌单元长度在 0.3 m 左右,外部单元在 1 m 左右。共划分单元 676 032 个,节点 705 863 个。在自重应力场中,由于地表以下任一深度 H 处的垂向应力等于其上覆岩体的重量,因此,对于覆盖层的垂直均布力,采用模型顶面边界施加其值为从模型边界到地表距离的岩体自重,即

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i \quad (2)$$

式中, γ_i 为第 i 层岩体重度(km/m^3); H_i 为第 i 层岩体的厚度(m)。

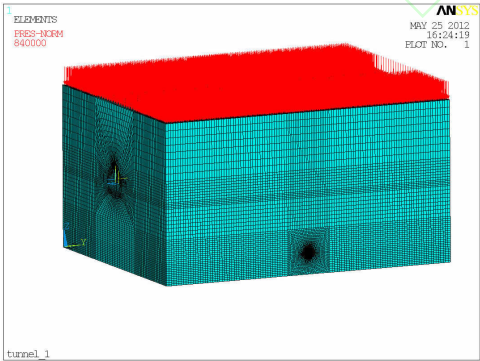


图 2 交叠隧道整体模型



图 3 铁路隧道与引黄隧洞位置关系

表 1 岩石物理力学参数

项目	弹性模量/GPa	泊松比	容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	阻尼比
Ⅳ级围岩	4	0.3	21	0.5	36	0.08
C25 喷砼	23	0.2	23	—	—	0.05
C30 砼	31	0.2	23	—	—	0.05
C25 钢筋砼	29.5	0.2	25	—	—	0.05

2 列车振动荷载的施加

上跨铁路隧道为双线铁路隧道,下穿线为引黄隧洞,考虑最不利情况下双线铁路隧道列车运行对下穿引黄隧洞的振动影响,即双向列车在该交叉段内会车。同时,假定在有限元计算 0 时刻,两列车正好到达模型两端边界断面处。

列车振动荷载的施加需要考虑列车在空间位置上的变化。图 4 为车轮位置关系,按照车轮位置关系处理竖向、横向轮轨力。

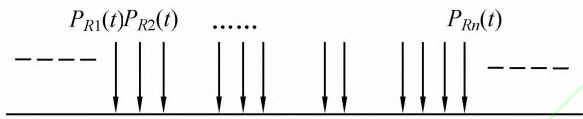


图 4 列车荷载示意图

首先对 C80 货车-轨道模型进行车-轨耦合动力分析,得到货车运行过程中各车轮的竖向、横向轮轨力。对轮轨力数据进行处理,使得所有车轮的轮轨力均从初始位置开始计时,没有到达初始位置的车轮的轮轨力记为 0。这样在仰拱上施加载荷时,即可在初始位置同时施加所有轮轨力,便于编写荷载施加程序。图 5、图 6 为不同轮对的车轮竖向、横向轮轨力时程曲线。

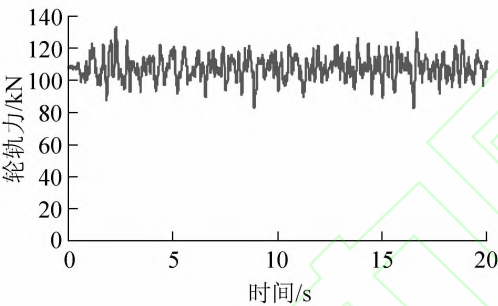


图 5 竖向轮轨力时程曲线(第 1 轮对)

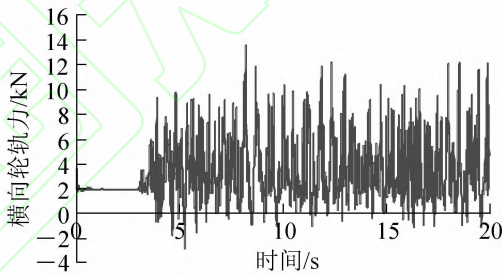


图 6 横向轮轨力时程曲线(第 20 轮对)

3 动力响应分析

采用瞬态分析中的完全法(FULL 法)计算列车荷载作用下的结构振动响应。时间步长为 0.005 s,采用 Rayleigh 阻尼形式,车辆运行速度 60 km/h。

将竖向、横向轮轨力以 TABLE 表格形式给出。

在计算过程中,载荷可以自动进行线性插值,并按 RAMPED 方式施加。瞬态分析中不考虑土体自重作用下的沉降。考虑各轮对进入列车的时间顺序,共划分 120 个载荷步。

选取交叉断面衬砌的拱顶、拱底、边墙处为关键点,如图 7 所示,提取该断面的关键点位置处的动力响应,分析有无减振措施情况下,铁路隧道与引黄隧洞的动力响应。

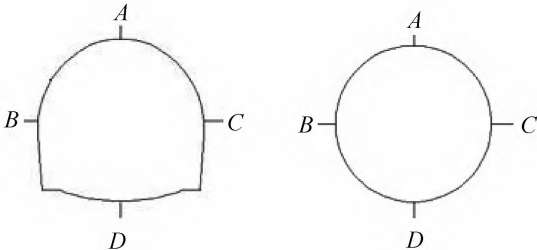


图 7 采样点示意图

3.1 无减振措施

图 8 为未铺设橡胶道床垫时,铁路隧道拱底中心位置的位移与加速度响应。图 9 为引黄隧洞交叉断

面拱顶位置的动力响应曲线。从图中可以看出,在货车刚到达时位移突然增大,之后随着货车车厢的通过,位移趋于平稳,铁路隧道拱底最大位移为 0.047 mm,最大加速度为 20.02 mm/s²,引黄隧洞交叉断面位置处拱顶最大位移 0.015 mm,最大加速度为 3.2 mm/s²。

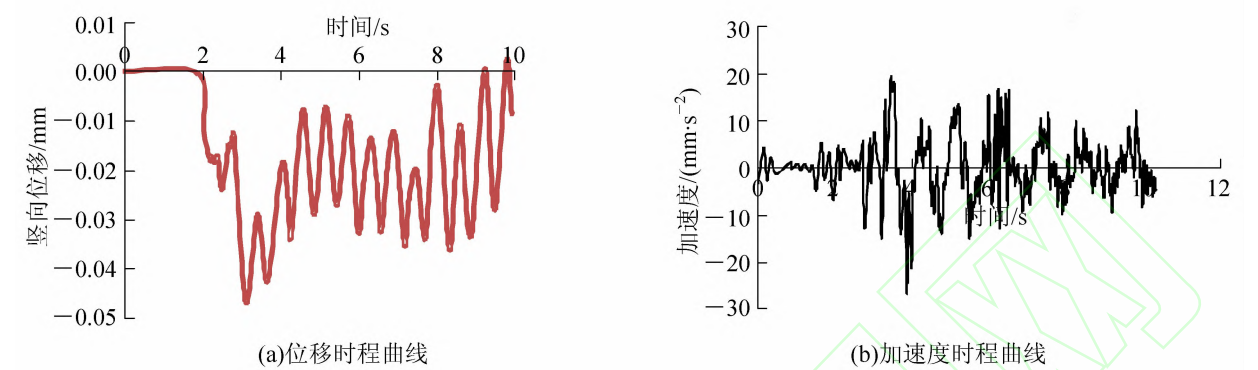


图 8 铁路隧道交叉断面仰拱(D点)时程曲线

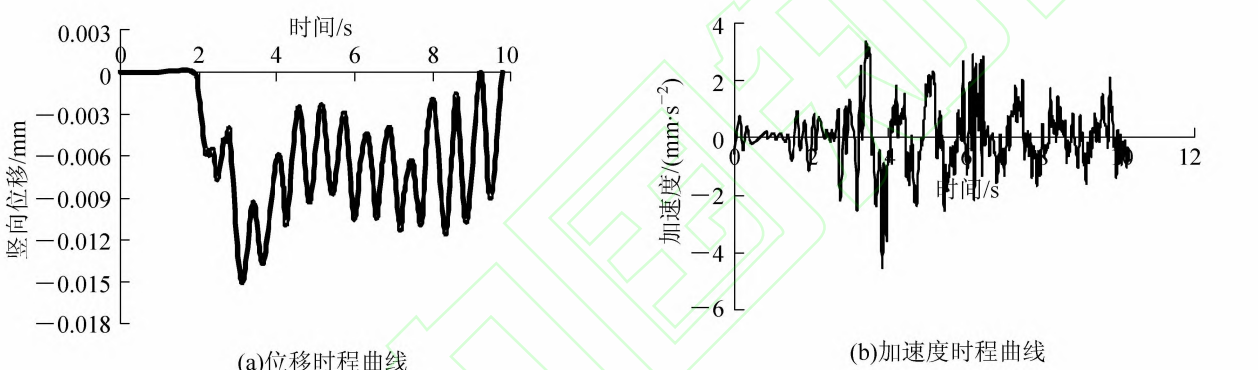


图 9 引黄隧洞交叉断面拱顶(A点)时程曲线

3.2 仰拱铺设橡胶垫层

为了减少列车运行对引黄隧洞的影响,设计中在隧道底部铺设两层 2 cm 厚度的橡胶垫层。橡胶垫层参数见表 2。道床垫有限元模型如图 10 所示,图 11 为铺设到床垫后的铁路隧道模型,图 12 为铺设道床垫后铁路隧道仰拱中心加速度,图 13 为铺设道床垫后引黄隧洞交叉断面拱顶中心加速度。表 3 为铺设橡胶垫层前后振动特性比较。

表 2 橡胶道床垫层计算参数

厚度/mm	弹性模量/(N·m ⁻¹)	泊松比	阻尼比
200	3×10 ⁷	0.5	0.1

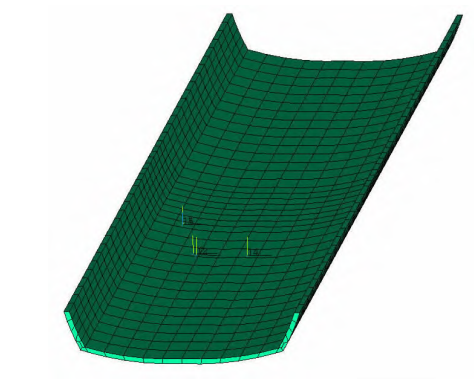


图 10 道床垫模型

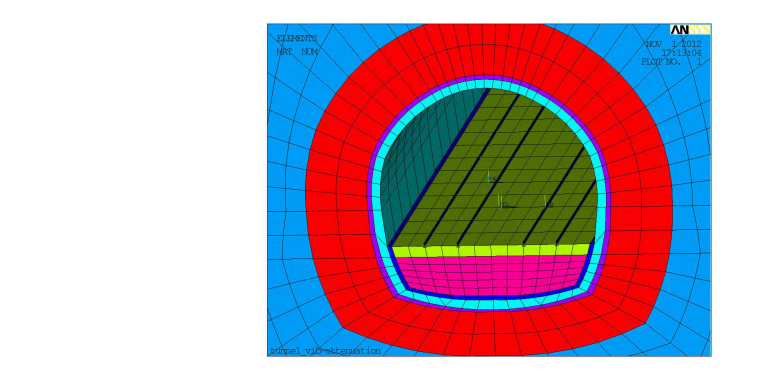


图 11 铺设道床垫后铁路隧道模型

从表 3 中可以看出,铺设橡胶道床垫后,铁路隧道及下方的引黄隧洞的位移响应变化不大,加速度响应减小明显,铁路隧道的加速度衰减量最大为 49.17%,发生在隧道拱顶位置,最大衰减量为 6.8 dB;引黄隧洞交叉断面的最大衰减量为 28.79%,发生在边墙位置,衰减量为 5 dB。因此,在平底板和侧边铺设减振橡胶垫层来减小铁路隧道和引黄隧洞的振动响应是一种可行的方法。

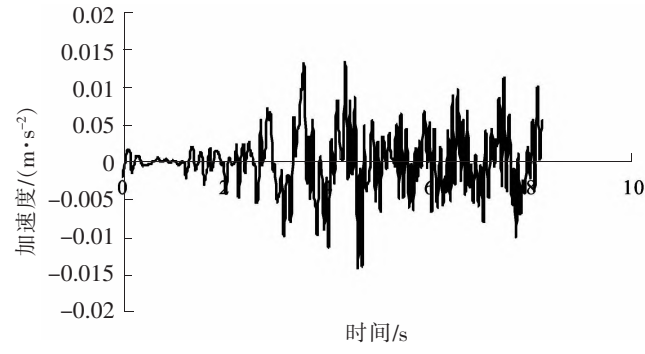


图 12 铺设道床垫后铁路隧道仰拱中心加速度

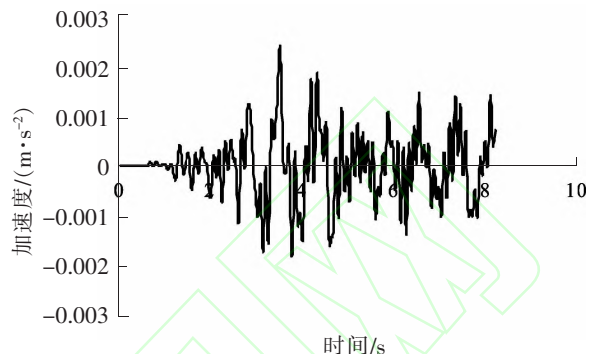


图 13 铺设道床垫后引黄隧洞交叉断面拱顶中心加速度

表 3 铺设橡胶垫层前后振动特性比较

类型	特征点	位移响应/mm		加速度响应/(mm·s ⁻²)		
		未加隔振层	加隔振层	未加隔振层	加隔振层	衰减量/%
铁路隧道	A 点	0.020	0.031	19.89	10.11	49.17
	B 点	0.028	0.039	18.45	9.44	48.83
	C 点	0.028	0.039	18.45	9.44	48.83
	D 点	0.047	0.061	20.02	11.15	44.31
引黄隧洞	A 点	0.015 1	0.015	3.20	2.37	25.94
	B 点	0.008 5	0.008 6	1.98	1.41	28.79
	C 点	0.008 5	0.008 6	1.98	1.41	28.79
	D 点	0.005 5	0.005 5	1.23	0.89	27.64

4 结论

列车提速、重载已经成为铁路发展的趋势,重载货车不仅是轴重增加,轮轨力的作用频率相比客车也大大增加,因此对周围环境的振动影响更加明显,需要进行深入研究。以某重载铁路上跨引黄隧洞为研究对象,分析了交叠隧道的振动特性,主要得到以下结论:

- (1) 分别建立了列车-轨道模型和轨道-隧道-围岩-交叉隧洞模型,前者为后者的动力分析提供了精确的轮轨力。
- (2) 提出一种新的列车荷载加载方式,所有车轮载荷均从 0 时刻开始计时,这样,所有车轮载荷可同时施加到边界作用点,不用考虑车轮在空间的分布,为列车振动荷载的施加提供了一种行之有效的方法。
- (3) 分析了有无橡胶阻尼垫层情况下,铁路隧道与引黄隧洞的动力响应。分析表明,在平底板底部和侧边施加橡胶垫层后,结构位移变化不大,铁路隧道的加速度衰减量最大为 49.17%,发生在隧道拱顶位置,最大衰减量为 6.8 dB;引黄隧洞交叉断面的最大衰减量为 28.79%,发生在边墙位置,衰减最大为 5 dB。

参 考 文 献

[1]周彪,谢雄耀.基于 FEM 和 TMM 方法的轨道-隧道-土层振动耦合响应分析[J].振动与冲击,2012,31(13):147-153.
[2]曲村,高亮,辛涛,徐亮.高速列车振动荷载作用下电缆隧道结构动力响应分析[J].振动与冲击,2011,31(13):264-268.
[3]耿传智,廖志军.地铁振动衰减特性研究[J].同济大学学报,2009,37(3):344-348.
[4]姚锦宝.考虑土-结构动力相互作用的轨道交通引起的环境振动及隔振措施研究[D].北京:北京交通大学,2010.

- [5] Yamaguchi I, Yamazaki I, Kiritani Y. Study of ground-tunnel interaction of four shield tunnels driven in close proximity [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(3):127-132.
- [6] 白冰, 李春峰. 地铁列车振动作用下交叠隧道的三维动力响应[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊):729-733.
- [7] 王祥秋, 杨林德, 周治国. 列车振动荷载作用下隧道衬砌结构动力响应特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7):1337-1342.
- [8] 栗润德. 地铁列车引起的地面振动及隔振措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [9] 楼梦麟, 贾旭鹏, 俞洁勤. 地铁运行引起的地面振动实测及传播规律分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3):282-288.
- [10] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [11] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] 王秀英, 龚增进, 刘维宁. 30 t 轴重条件下隧道技术标准研究[J]. 铁道工程学报, 2009(5):54-58.

Dynamic Response Analysis of Overlap Tunnels Under Heavy Haul Train Loading

Wang Cuiyan¹, Guo Yajuan², Chen Enli¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Beijing 102600, China)

Abstract: Heavy haul freight train-track model and tunnel-rock-tunnel finite element model is established in this paper. Precise horizontal and vertical wheel-rail forces are extracted for the external driving source of the tunnel and simplified loaded mode is suggested for the wheel-rail forces. The dynamic response of the overlap tunnels is analyzed with/without the rubber damping pad under the base slab. The analysis results show that when the rubber damping pad is applied to the bottom and sides of the flat base plate, the structural displacement changes little, and the maximum decrement of the acceleration attenuation of the railway tunnel is 49.17%, which occurs at the tunnel arch crown, and the maximum attenuation amount is 6.8dB; Yellow River-crossing tunnel has a top damping in the side wall, with the decrement of 28.79%, and the maximum damping capacity is 5dB. This study may provide theoretical reference for similar tunnel design.

Key words: heavy haul train; overlap tunnels; vibration absorber; train loading