

车辆荷载作用下超大断面双层隧道动力响应分析

李超凡

(安徽巢湖路桥集团有限公司, 安徽 巢湖 238000)

摘要: 针对温州大罗山隧道大断面双层结构力学复杂的特点, 建立三维隧道数值分析模型, 分析运营期车辆荷载作用下隧道结构的动力响应。结果表明, 车辆荷载作用下, 位移变化由大到小依次为车道、衬砌、围岩; 位移响应达到峰值后逐渐衰减, 直到荷载作用周期结束, 并产生位移残余; 加速度响应随着隧道轴线方向距离的增加而不断衰减, 仅在出口段有所增加。

关键词: 隧道; 大断面双层隧道; 衬砌结构; 车辆荷载; 动力响应

中图分类号: U458

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)03-0148-05

随着中国经济的快速发展和交通运输量的不断增加, 公路等级要求不断提高, 三车道大断面公路隧道相继涌现。国内对车载作用下大断面铁路隧道的动力响应研究颇多, 而对公路隧道动力响应的研究少见。该文依托温州大罗山大断面双层结构隧道工程, 研究运营期车辆荷载作用下隧道结构的动力响应, 为隧道结构的疲劳损伤研究与健康监控提供依据。

1 工程概况

温州环山北路项目大罗山隧道左线长 1 360 m, 右线长 1 430 m。开挖高度 13.8 m, 开挖宽度 16.52 m, 标准开挖断面 172 m², 最大开挖截面 200.49 m²。为上下双层对称四心卵形结构, 上层设置为三车道机动车道, 下层为非机动车道、人行道和通风管线通道。该隧道为扁平结构, 结构新颖, 工艺复杂, 施工技术难度大, 二次衬砌浇筑难度大。这种隧道结构国内罕见, 也是国内首座采用钻爆法施工的双层扁平结构隧道。

2 动力响应计算原理

2.1 车辆荷载模型

由于实际车辆荷载复杂多变, 数值分析时采用简化模型, 较常见的有均布恒载、移动恒载、波动荷载 3 种。均布恒载、移动恒载模型将荷载作为恒载考虑, 而车辆实际行驶中荷载作用位置和大小均随时间不断变化, 故将车辆轮胎荷载近似简化为路面集中点源荷载, 采用波动荷载的简化模型。

将车辆荷载转化为大小与作用位置均随时间以波动形式作用在路面上的半正弦荷载, 这种半正弦

荷载对路面某一点的力学作用数学表达式为:

$$F(t) = p + q(t) \quad (1)$$

式中: p 为恒载, 其大小等于轮压; $q(t)$ 为附加动荷载。

2.2 边界条件

较成熟的人工运动边界主要有黏性边界、叠加边界、旁轴边界、黏弹性边界、一致边界、透射边界和动力映射边界等。基于一维波动理论的一维黏弹性局部人工边界具有概念明确、运用便捷等优点; 基于柱面波动方程的二维黏性人工边界解决了一维局部人工边界低频漂移的问题, 且具有较好的高、低频稳定性; 基于三围球面波理论的三围时域黏弹性人工边界能对无限域介质中的波动进行模拟分析, 计算更方便、可靠。这里采用黏弹性边界, 其一般表达式为:

$$\sigma_{li}(t) = -K_{li}u_{li}(t) - C_{li}u'_{li}(t) \quad (2)$$

式中: 下标 l 为人工边界节点号; 下标 i 代表分量方向, $i = x, y, z$; t 表示时间; $\sigma_{li}(t)$ 、 $u_{li}(t)$ 、 $u'_{li}(t)$ 分别为节点 l 方向 i 的应力、位移和速度; K_{li} 、 C_{li} 为节点 l 方向 i 的黏弹性边界参数, 是无限域介质的材料常数和边界尺寸的函数。

2.3 数值计算方法

模型计算中采用的动力平衡方程为:

$$[M]u''(t) + [C]u'(t) + [K]u(t) = P(t) \quad (3)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $P(t)$ 为动力荷载; $u(t)$ 、 $u'(t)$ 、 $u''(t)$ 分别表示相对位移、速度、加速度。

采用 Rayleigh 阻尼表示隧道结构体系的阻尼机制, 即假定体系阻尼与刚度矩阵、质量矩阵成比例, 其数学表达式如下:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4)$$

式中: M 、 K 分别为体系的质量矩阵和刚度矩阵; α 、 β 为阻尼系数。

根据振型正交条件, α 、 β 与振型阻尼比之间满足以下关系:

$$\xi_k = \frac{\alpha}{2\omega_k} + \frac{\beta\omega_k}{2} = \frac{\alpha}{4\pi f_k} + \beta\pi f_k \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

式中: ξ_k 为阻尼比; ω_k 为固有圆频率; f_k 为固有频率。

模型计算采用收敛性较好的 Newmark 直接积分法,其基本假定如下:

$${}^{t+\Delta t}u' = {}^tu' + [(1-\delta){}^tu'' + \delta{}^{t+\Delta t}u'']\Delta t \quad (6)$$

$${}^{t+\Delta t}u' = {}^tu + {}^tu'\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) {}^tu'' + \alpha {}^{t+\Delta t}u'' \right] \Delta t^2 \quad (7)$$

式中: α 、 δ 为 Newmark 计算参数, $\alpha=0.5$ 、 $\delta=0.25$ 时始终稳定; Δt 为积分时间间距。

3 超大断面双层隧道动力响应分析

3.1 计算条件

由于大罗山隧道出口段地质条件复杂,围岩条件差(V级),选出口段 50 m 作为运营期研究对象。根据隧道实际施工进尺及锚杆布置间距,模型网格长度取为 0.5 m,整个隧道三围模型尺寸为长 74.5 m×宽 50.0 m×高 53.5 m。土层、衬砌及车道采用实体单元模拟,支护锚杆采用桁架单元模拟。围岩和支护结构参数见表 1。

锚杆直径为 0.025 m。根据抗压强度相等的原

表 1 围岩和支护结构参数

围岩或支护结构	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	抗拉强度/MPa	容重/(kN·m ⁻³)
上覆黏土	0.9	0.3	25	20	0.4	18.0
V 级围岩	0.8	0.3	34	10	0.4	18.0
锚杆	200.0	0.3	—	—	—	78.5
I18 工字钢拱架	210.0	0.3	—	—	—	78.5
C25 喷射砼	28.0	0.2	—	—	—	24.0

理,将 I18 工字钢拱架的弹性模量按式(8)折算到砼弹性模量中,便于模型计算与处理。

$$E = E_0 + \frac{S_g + E_g}{S_c} \quad (8)$$

式中: E 为折算后喷射砼弹性模量(MPa); E_0 为原砼弹性模量(MPa); S_g 为钢拱架截面面积(m²); E_g 为钢材的弹性模量(MPa); S_c 为砼截面面积(m²)。

3.2 动力响应分析

t 为 0.5 s、1.0 s、1.5 s、2.0 s、2.5 s、3.0 s、5.0 s 时隧道结构竖向位移峰值见图 1~7。由图 1~7 可知:

1) 在车辆前轴开始作用于隧道内车道时,车道竖向位移逐渐增大;中间车道竖向位移最大,逐渐向两边减小,相同位移区域呈圆环状;随着车辆载荷向前移动,车道竖向位移主要影响区域以整体圆环形式向前移动,位移主要影响区域为中间最大位移处前方、后方各 17 m 处。2) 隧道衬砌受到车辆载荷的影响产生位移响应,位移主要响应区域为圆形衬砌与车道衔接处,即隧道圆形衬砌左腰、右腰附近区域;拱顶虽然产生位移变化,但沉降量很小,最大值未超过 2 mm。

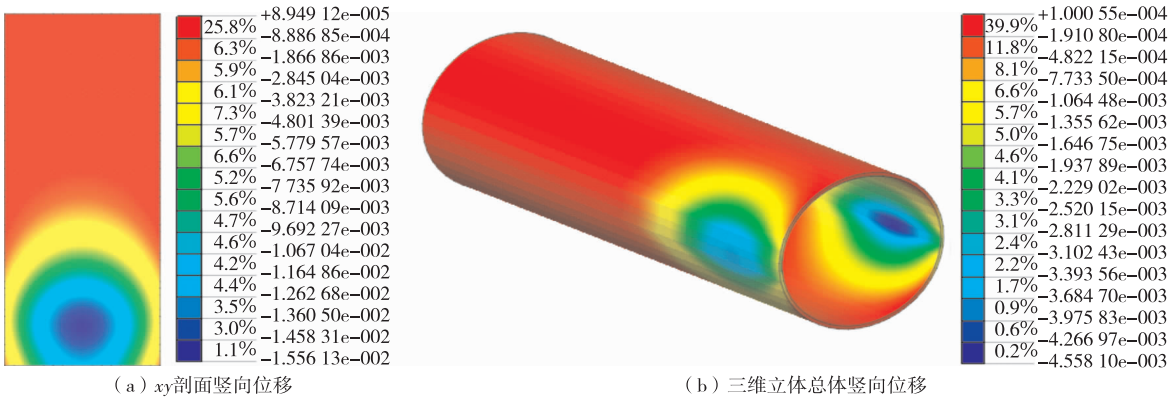
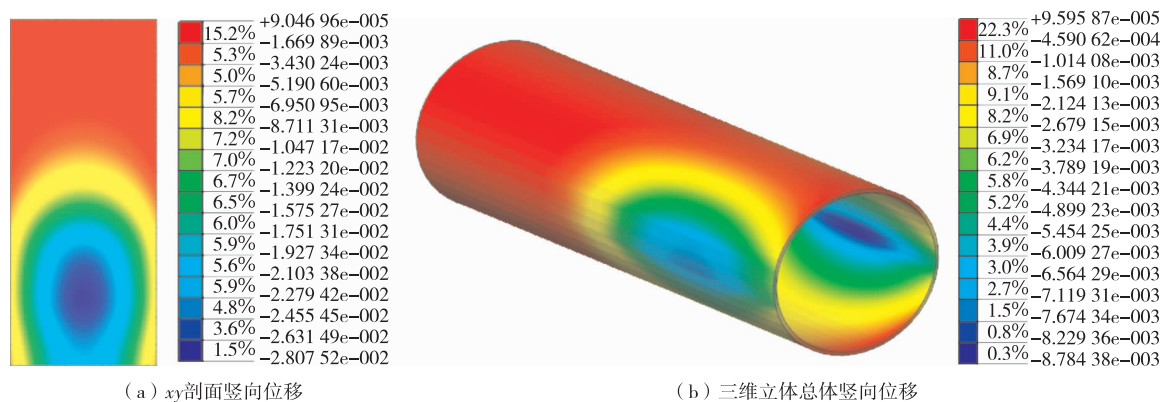
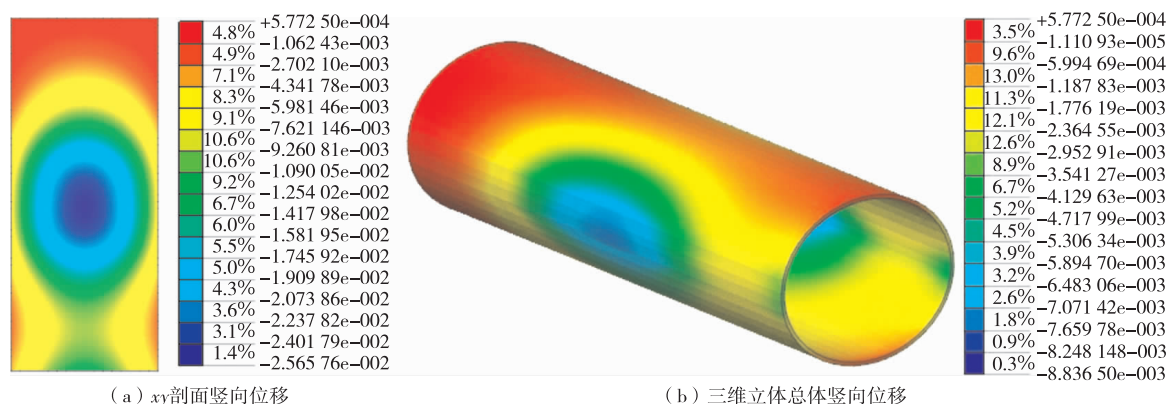
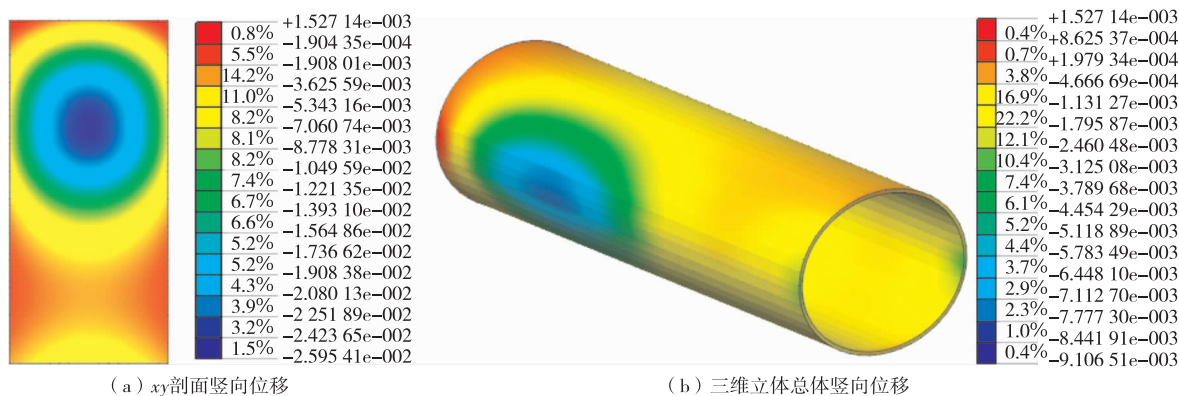
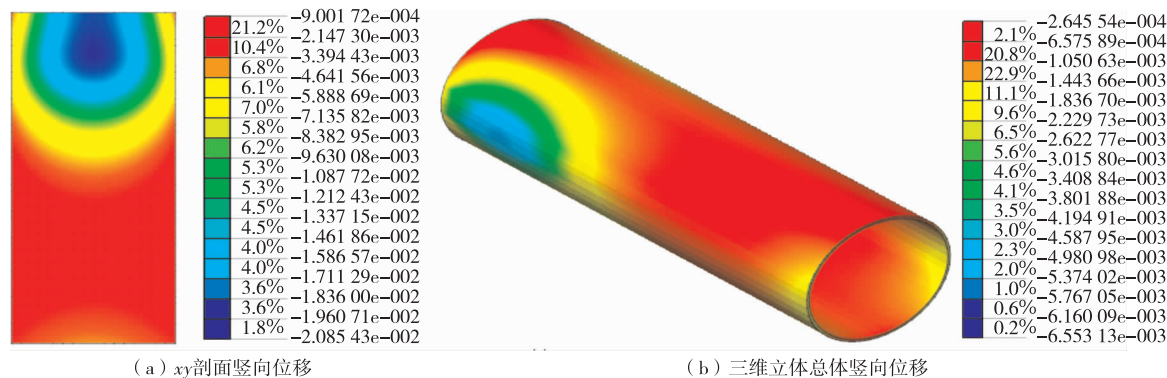
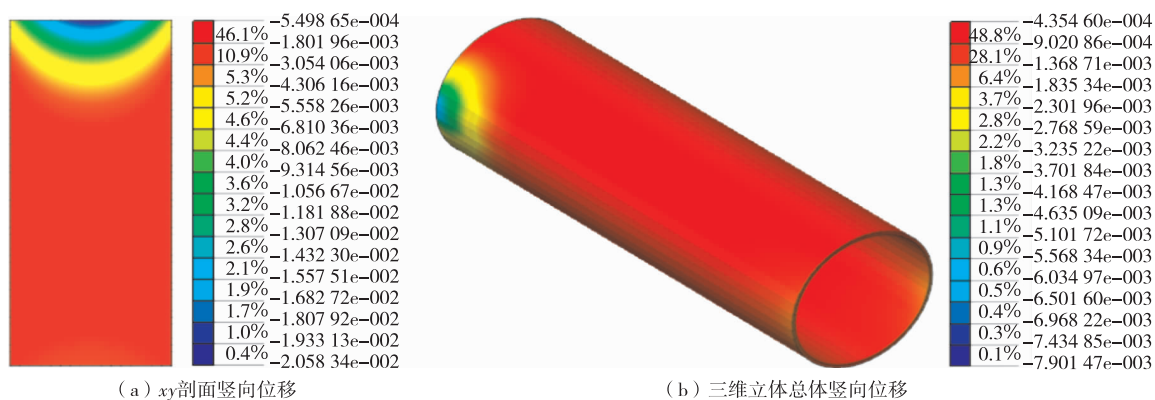
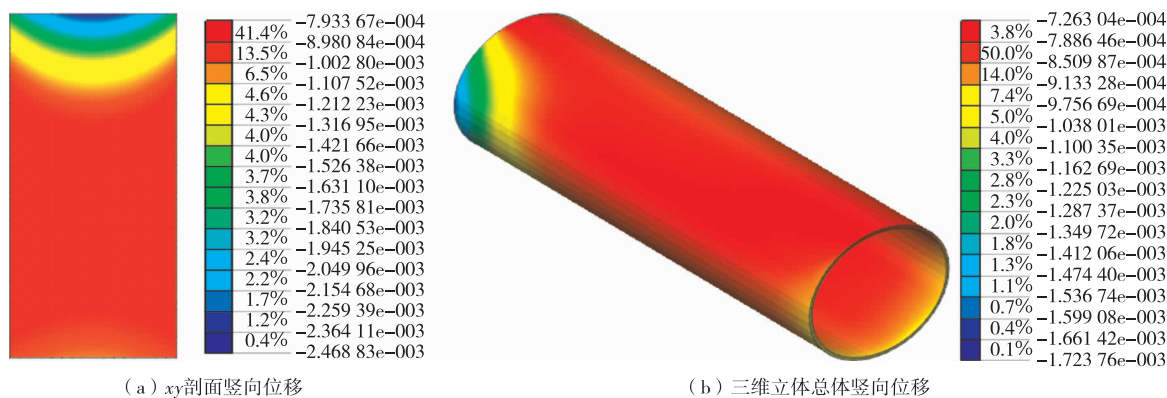


图 1 $t=0.5$ s 时隧道结构竖向位移峰值(单位:m)

图 2 $t = 1.0$ s 时隧道结构竖向位移峰值(单位:m)图 3 $t = 1.5$ s 时隧道结构竖向位移峰值(单位:m)图 4 $t = 2.0$ s 时隧道结构竖向位移峰值(单位:m)图 5 $t = 2.5$ s 时隧道结构竖向位移峰值(单位:m)

图 6 $t=3.0$ s 时隧道结构竖向位移峰值(单位:m)图 7 $t=5.0$ s 时隧道结构竖向位移峰值(单位:m)

根据计算结果,位移在车道中轴线上达到最大值。考虑到车道底面是整个隧道结构中最薄弱处,选取车道底面中轴线上 4 个节点进行位移时程分

析。4 个节点分别为车道底面中轴线上起始点、中点、全过程峰值点、终点,分别用 A、B、C、D 表示,各点位移时程曲线见图8~11。由图8~11可知:1) 受

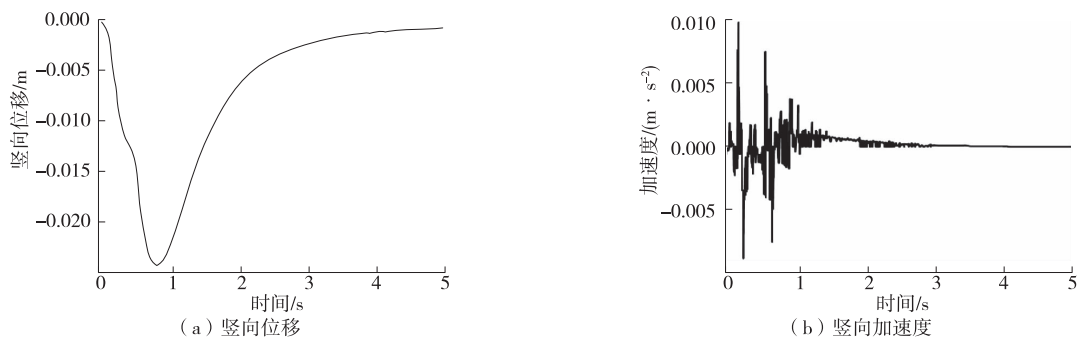


图 8 A 点位移时程曲线

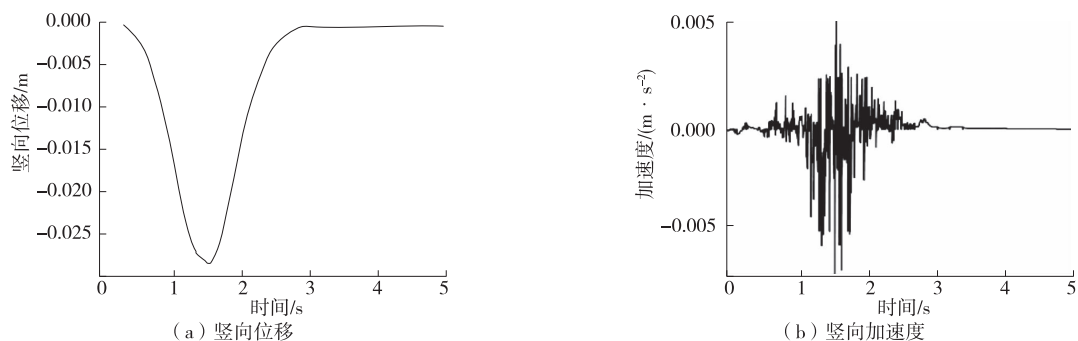


图 9 B 点位移时程曲线

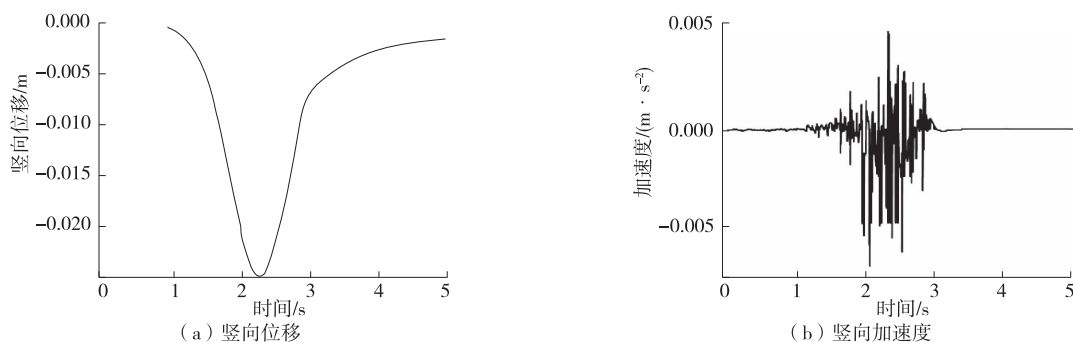


图 10 C 点位移时程曲线

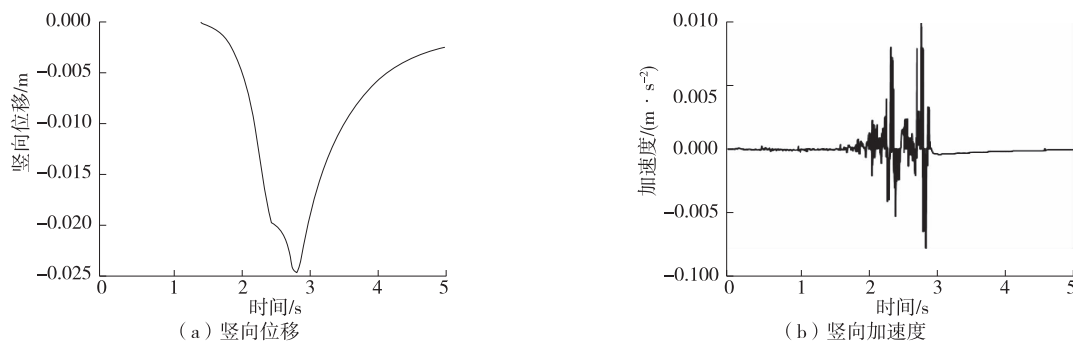


图 11 D 点位移时程曲线

到车辆荷载作用时,4 个节点都向下产生沉降并逐渐增大,达到峰值后竖向位移逐渐减小,随着载荷作用周期结束而停止。荷载周期结束后,4 个节点位移都不能回到原点,会产生位移积累,位移积累值将近 1 mm。2) 各点未受到车辆荷载作用或作用周期结束时,加速度时程曲线产生上下波动,表明加速度在车道传递距离较长。A 点加速度峰值大于 B 点峰值,B 点加速度峰值大于 C 点峰值,D 点加速度峰值在 4 个节点中最大,为 $0.009\ 8\ \text{m/s}^2$ 。这是由于 D 点位于隧道出口段,加速度无法再向前传递。

4 结论

(1) 车辆荷载作用下,隧道结构产生的动力响应具有明显的三维性和时程性,三轴方向均产生位移响应,并随着车辆荷载的加载周期产生响应。

(2) 车道、衬砌和围岩中,车道位移变化最大,其次是衬砌,围岩位移变化最小,三者位移都在 $t = 2\ \text{s}$ 时(距离隧道出口 5 m 处)达到最大值。车道中间区域沉降最大,衬砌则在与车道衔接处位移最明显。

(3) 在荷载作用周期结束后,隧道衬砌结构产生位移残余;随着隧道轴线方向距离的不断增加,车道加速度响应总体上不断衰减,仅在出口段加速度

有所增加。

参考文献:

- [1] 夏保祥,程崇国.三车道大断面公路隧道研究现状综述[J].地下空间,2002,22(4):360—366.
- [2] 黄晓吉,扶名福,徐斌.移动环形荷载作用下饱和土中圆形衬砌隧洞动力响应研究[J].岩土力学,2012,33(3):892—898.
- [3] 曾晨,孙宏磊,蔡袁强.简谐荷载作用下饱和土体中圆形衬砌隧道三维动力响应分析[J].岩土力学,2014,35(4):1147—1156.
- [4] 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.
- [5] 李亮,张丙强,杨小礼.高速列车振动荷载下大断面隧道结构动力响应分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23):4259—4265.
- [6] 廖振鹏.工程波动理论导论[M].2 版.北京:科学出版社,2002.
- [7] 黄娟.基于损伤理论的高速铁路隧道结构振动响应分析及疲劳寿命研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [8] 田甜,黎国清,齐法琳,等.速度 300 km/h 列车振动荷载下隧道衬砌加速度响应规律分析[J].铁道学报,2020,42(6):112—120.

(下转第 166 页)

表4 高速公路C下行K2149+000—K2167+000段
路面技术状况指标拟合方程

评价指标	拟合方程	参数说明
PQI	$PQI = 95.51 - \frac{55.51}{1 + e^{\beta + kt}}$	$\beta = 5.82; k = -0.81$
PCI	$PCI = 99.13 - \frac{59.13}{1 + e^{\beta + kt}}$	$\beta = 7.04; k = -1.27$
RQI	$RQI = 94.06 - \frac{54.06}{1 + e^{\beta + kt}}$	$\beta = 6.64; k = -0.57$
RDI	$RDI = 93.43 - \frac{53.43}{1 + e^{\beta + kt}}$	$\beta = 3.58; k = -0.38$
SRI	$SRI = 95.70 - \frac{55.70}{1 + e^{\beta + kt}}$	$\beta = 3.64; k = -0.50$

(2) 根据路面性能模型,路面性能指标在公路新建初期衰减较慢,在使用后期衰减速率明显增大,与路面实际情况一致。

(3) 局部修补可较大幅度改善PCI指标,但对RQI、RDI、SRI等指标的影响较小。

(4) 根据路面检测指标的衰减规律可获知既有道路近期采用的养护方式,也可作为后续沥青路面预防性养护方案决策及养护规划制定的重要依据。

参考文献:

[1] 徐剑,黄颂昌.沥青路面预防性养护理念与技术[M].北京:人民交通出版社,2011.

[2] 程苏鲁.江苏省高速公路沥青路面预防性养护时机研究[D].南京:东南大学,2012.

[3] 张金喜,孔祥杰,韩丁丁,等.不同养护模式下的高速公路沥青路面状况指数预测模型[J].北京工业大学学报,2016,42(1):74—80.

[4] 日本水泥混凝土协会.AASHO道路实验[R].东京:日本水泥混凝土协会,1966.

[5] KARIM Chatti, LEE Doseung. Development of a preventive maintenance strategy for minimizing roughness-related pavement damage[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1769(1): 39—45.

[6] LEE Doseung, KARIM Chatti, GIBERT Baladi. Development of roughness thresholds for preventive maintenance action aimed at reducing dynamic loads[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1816(1): 26—33.

[7] 玉俊杰.基于预防性养护的高速公路沥青路面使用性能评价和预测模型研究[D].北京:北京交通大学,2010.

[8] 周育名,李金明,李平,等.考虑公路等级的沥青路面性能衰变预测方法[J].中外公路,2019,39(1):34—39.

[9] 曹明明,岳建洪,陈金蓉,等.沥青路面预防性养护决策指标体系分析[J].公路与汽运,2020(1):34—39.

收稿日期:2021—12—01

(上接第152页)

[9] 徐利辉,马蒙,刘维宁.列车动荷载长期作用下圆形隧道衬砌损伤分布特征及演化规律研究[J].工程力学,2020,37(9):144—152.

[10] 张治国,冯驹,张孟喜,等.基于纤维混凝土韧性特征的列车荷载影响下隧道衬砌结构损伤发展分析[J].岩土力学与工程学报,2020,39(12):2483—2504.

[11] 杜建明,高修强,房倩,等.气动荷载作用下高速铁路隧道衬砌结构的疲劳累积损伤及残余寿命计算[J].中国铁道科学,2021,42(5):94—102.

[12] 加武荣.地铁列车振动荷载对下叠并行新建城际铁路盾构隧道的动力响应分析[J].城市轨道交通研究,2021,24(10):96—101+107.

[13] 黄光强,马少坤.交通荷载作用下矩形隧道结构动力响应研究[J].广西大学学报(自然科学版),2021,46(4):866—874.

[14] 罗红星,但路昭,秦雨樵.车辆荷载对浅埋大断面隧道

围岩的影响研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):100—104.

[15] RAKITIN B, XU M. Centrifuge testing to simulate buried reinforced concrete pipe joints subjected to traffic loading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11): 1762—1774.

[16] 杨宗桦,孙杰,陈士海.地面交通荷载对浅埋隧道的动力响应分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2021,42(3):343—350.

[17] 曾晨,孙宏磊,蔡袁强.简谐荷载作用下饱和土体中圆形衬砌隧道三维动力响应分析[J].岩土力学,2014,35(4):1147—1156.

[18] 黄晓吉,扶名福,徐斌.移动环形荷载作用下饱和土中圆形衬砌隧洞动力响应研究[J].岩土力学,2012,33(3):892—898.

收稿日期:2021—11—17