# 车辆荷载引起隧道地表沉降数值模拟研究

#### 潘夸世,于王成,苏哲阳,李佩青

上海理工大学环境与建筑学院,上海

收稿日期: 2024年6月27日; 录用日期: 2024年7月24日; 发布日期: 2024年7月31日

# 摘要

本文对车辆荷载进行简化,将其作用在最优条件下建立的数值模型上方,通过改变车辆荷载的表达式研 究隧道上方通行车辆的行车速度、车辆载重对隧道工程地表沉降的影响,结果表明相比无车辆荷载,研 究范围内车辆行车速度的增大使得地表沉降增大38%~123%,且当时速由20 km/h增大至40 km/h时, 车辆行车速度的影响更大;随着车辆载重的增大,地表沉降值越大且车辆载重对地表沉降的影响率越大, 相比行车速度,车辆载重的影响作用更明显。因此在实际工程中,应限制上方通行车辆的速度及车辆载 重,以保证地表沉降范围。

#### 关键词

地表沉降,数值模拟,车辆荷载

# Numerical Simulation of Tunnel Surface Settlement Due to Vehicle Loading

#### Kuashi Pan, Wangcheng Yu, Zheyang Su, Peiqing Li

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 27<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 24<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 31<sup>st</sup>, 2024

#### Abstract

This paper simplifies the vehicle load and puts it on the top of the numerical model established under the optimal conditions. By changing the expression of the vehicle load, we study the influence of the traveling speed of the vehicles passing over the tunnel and the vehicle load on the surface settlement of the tunnel project, and the results show that compared with the no-vehicle load, the increase of the vehicle speed within the study area makes the surface settlement increase by 38%~123%, and the influence of the vehicle speed is greater when it is increased from 20 km/h to 40 km/h; with the increase of the vehicle load, the value of the surface settlement is greater and

the influence rate of the vehicle load on the surface settlement is greater. When the speed increases from 20 km/h to 40 km/h, the influence of vehicle speed is bigger; with the increase of vehicle load, the value of surface settlement is bigger and the influence rate of vehicle load on surface settlement is bigger, compared with the speed, the influence of vehicle load is more obvious. Therefore, in the actual project, the speed and load of vehicles should be limited to ensure the range of surface settlement.

#### **Keywords**

Surface Settlement, Numerical Simulation, Vehicle Loading

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

# 1. 引言

近年来,随着我国经济社会的不断发展,隧道、地铁、桥梁及机场等工程处于高速发展阶段,在机 场修建改造过程中,常常面临隧道上方道路无法完全禁止车辆通行,具有车辆荷载的复杂情况。隧道工 程中,土体的开挖卸载会引起围岩发生应力重分布,进而引起地层损失和地层位移,使得地表发生沉降 和变形[1]土体本身存在力学平衡状态,隧道开挖会引起这一平衡状态的改变,使其产生应力重分布和地 表沉降现象。同时,隧道上方所受动荷载进一步增加了不确定性因素和预测难度。当隧道下穿既有公路 时,公路上行驶车辆的重力作用及对路面的振动作用必然会影响地下隧道的施工,造成地表沉降增大或 不均匀沉降等,进而影响正常的行车安全。

Wei [2]对深层土体沉降计算方法进行了改进,得到沉降槽宽度与深度之间的关系,提出了计算双线 盾构隧道不同深度处的沉降公式。Ma [3]等基于胡克定律和邓肯-张模型,通过引入损伤比的概念,建 立了软土地基沉降计算模型。提出了确定载荷作用前后土体变形模量的方法,提出了一种考虑软黏土结 构特性的非线性沉降计算方法。Sun [4]等介绍了基于有效应力的扰动度计算方法,对盾构施工引起的扰 动度进行了数值模拟。Wang [5]对隧道施工的地表变形和卸荷沉降等问题进行分析,发现通过一些合理 的支护措施,可以有效防止土体变形传递,从而防止地表变形及沉降。Yan [6]基于青岛地铁3号线的大 量实测数据,分析了大跨度浅埋暗挖车站的地面沉降规律,发现地下开挖站的水平面变化规律受多种因 素的影响,且站间水平面变形和沉降差异较大。鲍先凯等[7]采用三维有限元数值模拟软件 MIDAS GTS 对花椒箐隧道的实际情况进行了模拟,并分析了3种不同施工工法的地表沉降情况,将模拟结果与现场 监测结果进行比对,为今后类似情况的隧道工程提供一定的参考。Ding 等[8]通过数值模拟分析了在隧道 施工中下穿已有建筑物的地基基础形式、建筑物刚度、建筑物与隧道之间的角度、建筑物中轴线到隧道 中轴线之间的距离对路面沉降的影响。郑爱元[9]利用 FLAC 3D 模拟软件研究了小净距双线隧道施工所引 起的地表和衬砌结构变形情况,并对比实际监测结果,得出小净距施工会使上部地层的沉降增大且衬砌 偏压比较严重。丁振义[10]运用 MIDAS GTS NX 有限元分析软件,根据实际工程模拟了 3 个不同区段的 隧道施工,发现先行隧道的施工对地表沉降的影响较大,当双线隧道的间距较小时,其地表沉降曲线为 单峰型,同时最大沉降点靠近先行隧道一侧。牟天光等[11]将数值分析方法得到的结果与监测数据相结合, 对双线盾构隧道施工横向地表沉降规律进行分析,结果表明,沉降槽呈 V 型且先行隧道一侧的地表沉降 量最大。Tang 等[12]为了研究施工过程中车辆载荷对支管隧道稳定性的影响,改进了土层法的等效替代 方法,而不必考虑由于车辆载荷引起的破裂角的变化。Luo 等[13]研究水下浮动隧道(SFT)在车辆冲击载 荷作用下的动态响应,通过拉格朗日方程开发了一个考虑车辆、系绳和柔性边界管耦合振动的 SFT 数学 模型。讨论了管端刚度、冲击载荷、车辆载荷对 SFT 动力响应的影响规律。Yiqiang Xiang 等[14]为了研 究移动车辆荷载下水下浮式隧道(SFT)的动态行为,设计并分析了 SFT 实验模型,论了不同参数的电缆和 车辆对 SFTs 的影响。Xinzhuang Cui 等[15]研究了路堤高度和车辆荷载对交通诱导累积沉降的影响,发现 车辆荷载越大,累积荷载增长的越快,因此需要限制车辆超载并提出累积沉降预测模型。Y. Zhuang [16] 研究了公路桩路堤在移动车辆荷载作用下的拱形。并基于 Boussinesq 方程,通过考虑移动车辆载荷引起 的附加垂直应力,开发了一种改进的解析方法。

目前国内外研究在隧道工程下穿既有公路工程中,多数研究考虑隧道开挖对上方路面所造成的沉降、 不均匀沉降等影响,而较少考虑原路面上通行车辆对施工过程中振动作用的影响和此影响所造成的附加 沉降。本文以南崇铁路引入某机场隧道工程为例,通过有限元软件 MIDAS GTS NX 建立三维模型,分析 了车辆行车速度与载重对地表沉降的影响规律。

#### 2. 有限元模型建立

选用有限元软件 MIDASGTSNX 建立隧道施工模型。将各土层简化为均匀土层,各土层土体物理力 学参数如表 1 所示。模拟数值模型土体边界距离隧道中线取 3~5 倍洞径,隧道断面尺寸如图 1 所示,选 取单隧道模型尺寸为 100 m×70 m×35 m,双隧道模型尺寸为 150 m×70 m×35 m。为了减小边界效应, 设置边界约束条件为模型上顶面自由,下底面为固定面,其余 4 个面均限制其水平方向的位移,保证情 况与实际工程相符。土体采用摩尔 - 库伦模型,支护结构采用弹性模型,结构参数如表 2 所示。r 为隧道 内径,R 为隧道外径,O 为隧道圆心。隧道开挖采用交叉中隔墙法,隧道埋深位置为 10 m,其中,双隧 道之间的净距为 15 m,施工顺序采用先开挖左线隧道,开挖进尺达到 15 m 后进行右线隧道的开挖。

#### 3. 车辆荷载计算模型

本文采用正弦波荷载模型来对车辆荷载进行模拟,其荷载表达式[17]如下:

$$F(t) = P_0 + P_d \sin(\omega t) \tag{1}$$

式中P<sub>0</sub>为车辆静载,P<sub>d</sub>为动载幅值,其计算公式为:

$$P_d = M_0 \alpha \omega^2 \tag{2}$$

式中 $M_0$ 为汽车簧下质量,  $\alpha$ 为几何不平顺矢高,通常取为 2 mm,振动圆周率 $\omega = 2\pi v/L$ , L为车辆长度, v为车辆行驶速度。

Table 1. Soil mechanical parameter 表 1. 土体力学参数

土层 编号	土层 名称	土层厚 度 d/m	弹性模量 E/(kN·m <sup>-2</sup> )	泊松 比 <i>v</i>	重度 γ/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 c/kPa	摩擦角 φ/(°)	静止侧压 力系数 K0	渗透系数 K0/(m·d <sup>-1</sup> )	初始孔 隙比 e0
1-2	素填土	3	6630	0.3	19.71	5	6	0.43	$1.74\times10^{-7}$	0.67
1-5	碎石土	4	34500	0.2	19.61	0.5	25	0.25	0.00058	0.50
9-2	强风化泥 质砂岩	8	93085	0.17	23.63	0.58	45.6	0.20	0.000463	0.42
9-3	中风化泥 质砂岩	55	138000	0.17	24.03	1.07	37.3	0.20	$1.62\times10^{-6}$	0.50



Figure 1. Schematic diagram of tunnel section 图 1. 隧道断面示意图

Table	<b>2.</b> Supporting structure parameters
表 2.	支护结构参数

结构名称	弹性模量 E×10 <sup>-5</sup> /(kN·m <sup>-2</sup> )	泊松比v	重度 y/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 c/kPa	摩擦角 φ/(°)
超前支护	1.33	0.17	24.6	0.68	46.93
初期支护	230	0.2	22.0		
二次衬砌	325	0.2	25.0		
临时支撑	230	0.2	22.0		
仰拱填充	280	0.2	23.0		
封闭掌子面	230	0.2	22.0		
锚杆	2100	0.3	78.5		

由于附近施工的需要,主要通行车辆为载重汽车,取其车辆簧下质量为 5 kN·s<sup>2</sup>/m,参照《公路工程 技术标准》(JTG B01-2014),载重汽车的外廓尺寸示意图如图 2 所示,L = 12 m,前轮着地长度和宽度为 0.3 m×0.2 m,中后轮着地长度和宽度为 0.6 m×0.2 m,即车辆荷载作用面积为 $A = 0.3 \times 0.2 \times 2 + 0.6 \times 0.2 \times 4 = 0.6$  m<sup>2</sup>。



**Figure 2.** Schematic diagram of the outside dimensions of a laden vehicle 图 2. 载重汽车外廓尺寸示意图

进行动力分析时,由于模型边界的反射作用,模拟分析结果会有一定的误差。利用 MIDAS GTS NX 提供的自由场边界,能够有效减小边界的反射作用,因此在进行车辆荷载的过程中,对模型的边界约束 条件进行控制,顶面自由,底面为固定面,其余面设置自由场边界。同时车辆在行驶过程中,与地面产 生摩擦作用,将其作用考虑在内,设置阻尼比为 0.314。

本文对车辆荷载的分析主要包括两个方面:行车速度和车辆荷载。分析行车速度的影响时,控制车辆静载为100 kN不变,改变车辆时速分别为20 km/h、40 km/h、60 km/h;分析车辆荷载对地表沉降的影响时,设置行车速度为20 km/h不变,改变车辆静载分别为100 kN、200 kN、300 kN。各情况下的应力大小应先计算出总荷载的大小和荷载作用面积的大小,再算出各单位面积所受的应力大小,即

$$P(t) = \frac{F(t)}{A} = \frac{P_0 + P_d \sin(\omega t)}{A}$$
(3)

参照实际工程中 G322 国道与隧道的相对位置关系,设置数值模拟过程中地表行车路面与隧道的位 置关系,车辆荷载的加载模型如图 3 所示。由于边界会对动力荷载产生一定的反射作用,同时更直观地 分析车辆荷载的影响,选择地表沉降曲线的位置为模型宽度的中间位置,即车辆荷载刚好经过隧道正上 方,具体位置示意图如图 4 中红线所示。



Figure 3. Numerical modeling of vehicle loads 图 3. 车辆荷载数值模型



Figure 4. Surface settlement curve location map 图 4. 地表沉降曲线位置图

# 4. 行车速度对地表沉降影响研究

# 4.1. 不同行车速度引起的地表沉降

图 5 为无车辆荷载及不同行车时速(包括 20 km/h、40 km/h、60 km/h)对地表沉降三维沉降位移云图。



从图 5 可以看出,当隧道上方有时速 20 km/h 的车辆荷载作用时,土体最大沉降值略微增大,但由 于此时车辆行驶速度较慢,车辆对路面的振动作用小,故对沉降影响较小。加载速度为 40 km/h 时,此 时车辆行驶速度相对增大,因此其对路面的振动作用增大,造成土体沉降进一步增大。当行车速度为 60 km/h 时,相比于行车时速为 40 km/h,此时的最大沉降值增大约 1.1 mm,同时地表车辆加载位置处的沉 降量进一步增大,影响范围增大,表明当车辆时速为 60 km/h 时,对土体的扰动作用较大,引起的土体 沉降值也相对增加。三种情况下,三维沉降位移云图中的最大沉降值相对增量不大,说明车辆时速的变 化对三维最大沉降的影响不大,但增大了沉降范围。

#### 4.2. 不同行车速度引起的地表沉降对比分析

图 6 为无车辆荷载及不同行车速度下地表沉降曲线的对比图,从图中可以看出,四种情况下地表沉降曲线趋势均相同,最大地表沉降值均位于隧道中线上方,且沉降值向两侧逐渐减小,并且在隧道拱肩侧有一定的隆起量,车辆荷载的存在对隆起量的影响较小。当地表有车辆荷载作用时,隧道中线两侧均 有沉降极大值,主要原因为数值模拟过程中将车辆荷载简化为作用于节点处的力所产生的局部作用。行 车速度为 20 km/h、40 km/h 和 60 km/h 时所引起的地表沉降曲线对比表明,随着车辆行驶速度的增加, 地表最大沉降值由无车辆荷载时的 13 mm 增大至 18 mm、24 mm 和 29 mm,分别增加了 38%、84%、123%, 可以看出车辆时速由 20 km/h 增大至 40 km/h 时行车速度对地表沉降的影响率更大。因此,在开挖隧道的 同时,上方路面有无车辆的通行及车辆行驶的速度对地表沉降及施工安全有很大的影响。实际工程情况 中,应综合各方面因素,合理控制工程周边既有道路通行环境。在本文研究的工程条件下,由于临近机 场,交通通行需求量大,且对地表沉降要求较高,为同时满足各方面的需求,限制通过 G322 国道与隧 道空间交叉路段范围内的车辆行驶速度不得超过 20 km/h。



**Figure 6.** Comparison of surface settlement curves without vehicle loading and at different travel speeds 图 6. 无车辆荷载及不同行车速度下地表沉降曲线的对比图

### 5. 车辆载重对地表沉降影响研究

#### 5.1. 车辆不同静载引起的地表沉降

保持行车速度为 20 km/h 不变,则振动圆频率  $\omega$  和动载幅值  $P_d$  不变。车辆静载 100 kN 时的情况如 图 5(a)所示,增大车辆静载为 200 kN、300 kN,加载车辆荷载后的三维沉降位移云图如图 7 所示。



**Figure 7.** Comparison of three-dimensional settlement and displacement of vehicles with different static loads 图 7. 车辆不同静载三维沉降位移对比图

由图 7 可以看出,当静载为 200 kN 时,车辆静载的增大对土体沉降影响明显,车辆荷载作用范围内, 土体沉降量增大,与图 5(a)相比,车辆荷载影响沉降范围增大,且最大沉降值增加 48%。当静载为 300 kN 时,整体沉降与车辆静载为 200 kN 时情况相似,拱顶位置处取得最大沉降值,向周围沉降值逐渐减小, 同时由于车辆荷载的作用,沉降影响范围增大。此时车辆静载值较大,加载过程中产生的振动作用也较 大,因此在车辆荷载作用范围内沉降值波动情况明显。整体的最大沉降值由 35.9 mm 增大至 66.0 mm, 远超过施工要求限制,对施工情况极为不利。

#### 5.2. 不同车辆静载引起的地表沉降对比分析

从图 8 中可以看出,四种情况下地表沉降曲线均在隧道中线位置处取得最大沉降值,向两侧沉降值逐 渐减小,并在隧道拱肩外侧位置处有一定的隆起量。随着车辆静载的增大,沉降曲线的沉降槽宽度有所 增加,且由于数值模拟过程中将车辆荷载简化为作用于节点的力产生的局部作用,有车辆荷载的情况下,





均在隧道中线两侧有一定的沉降极大值。地表沉降最大值由无车辆荷载时的 13 mm 逐渐增大至 18 mm、26 mm 和 39 mm,增长率分别为 38.5%、100%和 200%,随着车辆静载的增大,其对地表沉降的影响也增大, 且与车辆行驶速度对地表沉降的影响情况相比,地表沉降受车辆静载的影响更大。因此在隧道施工过程中,应严格控制上方道路通行车辆的载重不超过 100 kN,保证施工安全和地表沉降在安全范围内。

#### 6. 结论

(1) 行车速度的增大,不会引起地表沉降曲线趋势的改变,四种条件下地表沉降曲线均在隧道中线位置上方取得最大沉降值且呈"V"型。地表沉降最大值随着行车速度的增加而增加。由于本工程所处区域交通量需求大,经各因素考虑,应控制上方通行车辆的行车速度不超过 20 km/h。

(2) 当车辆载重不断增加时,地表沉降曲线的沉降槽宽度有所增加,且拱顶处的最大沉降值及地表沉降最大值均增大。三种不同车辆载重的结果表明车辆静载越大,对地表沉降的影响越大,越不利于施工安全和周围环境。为保证施工安全,需严格控制通行车辆载重不超过100 kN。

# 参考文献

- [1] 杨福麟, 刘永林, 胡斌. 武汉地铁隧道开挖引起地表沉降的数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 85-91.
- [2] Weig (2013) Prediction of Soil Settlement Caused by Double-Line Parallel Shield Tunnel Construction. *Disaster Advances*, **6**, 23-27.
- [3] Ma, B., Li, Z., Cai, K., et al. (2021) An Improved Nonlinear Settlement Calculation Method for Soft Clay Considering Structural Characteristics. Geofluids, 2021, Article ID: 8837889. <u>https://doi.org/10.1155/2021/8837889</u>
- [4] Sun, F., Jin, Z., Wang, C., et al. (2023) Case Study on Tunnel Settlement Calculations during Construction Considering Shield Disturbance. KSCE Journal of Civil Engineering, 27, 2202-2216. https://doi.org/10.1007/s12205-023-0925-z
- [5] Wang, X., Li, S., Wei, Y., et al. (2022) Analysis of Surface Deformation and Settlement Characteristics Caused by Tunnel Excavation and Unloading. Geofluids, 2022, Article ID: 5383257. <u>https://doi.org/10.1155/2022/5383257</u>
- [6] Yan, J., Liu, X., Bai, X., et al. (2021) Research on Surface Subsidence of Long-Span Underground Tunnel. Advances in Civil Engineering, 2021, Article ID: 6643892. <u>https://doi.org/10.1155/2021/6643892</u>
- [7] 鲍先凯,曹嘉星,段东明,等. Midas/GT 在软岩隧道施工设计中的应用[J]. 公路, 2019, 64(7): 321-325.
- [8] Ding, Z., Ji, X.F., et al. (2019) Numerical Investigation of 3D Deformations of Existing Buildings Induced by Tunnelling. Geotechnical and Geological Engineering, 37, 2611-2623. <u>https://doi.org/10.1007/s10706-018-00781-1</u>
- [9] 郑爱元. 小净距双线隧道施工衬砌稳定性分析[J]. 工程技术研究, 2019, 4(16): 30-31.
- [10] 丁振义. 双线隧道施工引起的地表沉降及其控制措施研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [11] 牟天光,祝江林.不同施工条件下双线盾构隧道施工引发地表变形规律研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版),2020,32(4):75-79.
- [12] Tang, L., Quan, Y., Zhu, Y., et al. (2018) Application of Improved Calculation Method Considering the Vehicle Loads in Branch Utility Tunnel. Geotechnical and Geological Engineering, 37, 251-266. https://doi.org/10.1007/s10706-018-0606-8
- [13] Luo, G., Zhang, Y., Ren, Y., et al. (2021) Dynamic Response Analysis of Submerged Floating Tunnel under Impact-Vehicle Load Action. Applied Mathematical Modeling, 99, 346-358. <u>https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.06.024</u>
- [14] Xiang, Y.Q., Lin, H., Bai, B., et al. (2021) Numerical Simulation and Experimental Study of Submerged Floating Tunnel Subjected to Moving Vehicle Load. Ocean Engineering, 235, Article 109431. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109431
- [15] Cui, X., Zhang, N., Li, S., et al. (2014) Effects of Embankment Height and Vehicle Loads on Traffic-Load-Induced Cumulative Settlement of Soft Clay Subsoil. Arabian Journal of Geosciences, 8, 2487-2496. <u>https://doi.org/10.1007/s12517-014-1402-2</u>
- [16] Zhuang, Y. and Wang, K.Y. (2018) Finite-Element Analysis of Arching in Highway Piled Embankments Subjected to Moving Vehicle Loads. *Géotechnique*, 68, 857-868. <u>https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.266</u>
- [17] 田飞, 褚进晶. 交通荷载特性及其模拟方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(4): 66-71+161.