

地面荷载对城市隧道围岩变形破坏特征影响

张新军¹, 张春雷², 秦雨霏², 沈威², 王建望³

(1. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710055;

2. 淮阴工学院, 江苏 淮安 223001; 3. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 地面荷载对城市隧道围岩变形破坏的影响是隧道工程设计与施工中需要考虑的重要问题。为了探究不同地面荷载条件下隧道围岩的应力、位移分布特征及破坏模式,以某路综合改造工程为背景,基于 PHASE2D 数值模拟,通过正交试验设计,分析地面荷载大小、分布形式、水平距离及隧道断面形状等因素对围岩应力和位移的影响规律。结果表明:不考虑开挖断面因素,从荷载角度看,荷载水平距离对隧道围岩垂直应力影响最大,其次是荷载分布形式,最后是荷载大小;荷载水平距离对隧道围岩垂直位移影响最大,其次是荷载大小,最后是荷载分布形式。荷载距隧道中线水平距离越近,对围岩变形的影响越大;均布荷载对围岩变形的影响显著大于集中荷载;荷载越大,围岩变形破坏程度越严重;埋深较浅时,拱形断面表现出较好的稳定性。地面荷载对城市隧道围岩变形影响因素最大的是荷载距隧道的水平距离,其次是荷载分布形式,再次是荷载大小。

关键词: 地面荷载; PHASE2D; 围岩应力; 隧道断面; 堆载位置

中图分类号: TU91

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)02-0191-06

Impacts of Ground Loads on Deformation and Failure Characteristics of Urban Tunnel Surrounding Rock

ZHANG Xinjun¹, ZHANG Chunlei², QIN Yufei², SHEN Wei², WANG Jianwang³

(1. China Railway First Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710055, China;

2. Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu 223001, China;

3. School of Civil Engineering, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: The influence of ground loads on the deformation and failure of urban tunnel surrounding rock is a critical issue in tunnel engineering design and construction. To investigate the stress distribution, displacement characteristics, and failure modes of surrounding rock under various ground load conditions, this study employs PHASE2D numerical simulation and orthogonal experimental design, focusing on a comprehensive road reconstruction project. Key factors including load magnitude, distribution pattern (uniform vs. concentrated), horizontal distance from the tunnel centerline, and cross-sectional shape are analyzed. Results are as follows. From the load perspective (excluding excavation cross-section effects), the horizontal distance of the load exerts the most significant influence on vertical stress, followed by load distribution pattern, and finally load magnitude. For vertical displacement, horizontal distance remains the dominant factor, succeeded by load magnitude and distribution pattern. The closer the horizontal distance of the load to the tunnel centerline, the greater the impact on surrounding rock deformation. Uniform loads induce notably more severe deformation than concentrated loads. Increased load magnitude intensifies deformation and failure of surrounding rock. Under shallow burial conditions, arch-shaped cross-sections demonstrate superior stability compared to other configurations. The main influencing factors of ground load on urban tunnel surrounding rock deformation are the horizontal distance between the load and the tunnel, followed by the form of load distribution, then the magnitude of the load.

Keywords: ground loads, PHASE2D, surrounding rock stress, tunnel cross-section, loading position

收稿日期: 2024-12-11

修稿日期: 2025-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(52404081); 中国博士后科学基金项目(2022M722673); 江苏省大学生创新创业训练计划项目(202411049076Y)

作者简介: 张新军(1988—), 男, 工程师, 主要从事道桥与隧道工程方面的工作。E-mail: 1040641739@qq.com

通讯作者: 张春雷(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地下空间围岩稳定控制和地下空间开发与利用方面的工作。

E-mail: fangyuanleihua@126.com

随着我国城市化进程的加速和城市人口的持续增长,城市地下隧道的建设成为缓解市区交通压力、提升人员流动效率、促进城市发展的重要手段。然而,在城市生态敏感区修建隧道时,隧道地面及周边往往存在大型建筑物、交通运输设施或其他重型结构。这些结构对地面的荷载会传递至隧道围岩,导致围岩受到挤压而发生变形,严重时可能引发围岩破坏,甚至造成工程安全事故。因此,地面荷载对隧道围岩稳定性的影响成为隧道工程设计和施工中必须重点考虑的关键因素之一。

为了探究地表荷载对城市隧道开挖的影响规律和特征,国内外学者开展了大量研究^[1]。吴庆等^[2]通过室内模型试验对堆载作用下既有盾构隧道结构的变形特征进行了研究。刘方琨等^[3]、张石斌等^[4]、闻燕^[5]也通过大量计算结果证明用数值模拟的方式来研究新建工程对既有隧道的影响是可行的,可以模拟出既有隧道在建筑施工过程中受到的影响。路德春等^[6]利用 ABAQUS 有限元分析了盾构下穿施工过程既有马蹄形隧道的变形机理;谭树增等^[7]基于有限元软件 MIDAS 模拟了软土区基坑开挖对场地变形、临近隧道及建筑的影响;胡垚等^[8]研究了行车荷载不同施加位置对地层和重叠隧道变形的影响,为重叠隧道的设计提供参考;刘锦等^[9]运用 MIDAS 模拟地面建筑施工中施加不同的楼层荷载,再结合现场监控量测手段,综合分析了地面建筑荷载对既有隧道的影响;杨宗桦^[10]将地面交通荷载进行合理近似简化,探讨了移动荷载速度及隧道埋深对动力响应的影响;张会^[11]采用数值模拟与现场实测相结合的方法,对行车荷载作用下隧道施工期间的动响应进行了研究。以上研究均针对荷载位置、大小等单一因素或少量多因素对地下隧道的影响,未综合考虑多影响因素共同作用下地下隧道围岩力学响应特征。

本文以某路综合改造工程为背景,根据隧道围岩所受不同地面荷载形式,基于 PHASE2D 建模,通过正交试验探讨不同地面荷载条件下隧道围岩的破坏特征,分析隧道围岩的破坏模式及围岩的应力、应变和位移等参数变化规律,以期采用合适基坑支护结构和施工工艺提供理论支撑,确保隧道在不影响周围建筑物的前提下,在地面荷载作用下能够稳定可靠地运行。

1 工程概况

某路综合改造工程项目位于湖州市安吉县云鸿

路,道路呈东西走向,本次一期工程施工图设计范围西起清远路以西,东至三友路交叉口附近,起止里程桩号为 K6+380—K12+660,全长约 6.28 km,红线宽度约 35 m~62 m,道路等级为城市主干路。工程全线采用“地下主干路+地面主干路”相结合的建设形式,全线共设置 4 条隧道,均为双向四车道,包括 1 条二类隧道(4 号隧道),2 条三类隧道(1 号、3 号隧道),1 条四类隧道(2 号隧道),隧道周边环境复杂,施工制约因素多,云鸿路是城市主干道,车流量较大,同时道路两侧下方存在大量的市政管线;项目主要工点从安吉县城市中心地带穿过,线路南北两侧建筑物密集,距离基坑均在 50 m 以内,隧道工程施工周边环境复杂。

2 数值模型的建立

2.1 模拟方案制定

地面荷载是隧道围岩受力的重要因素,对围岩的变形和破坏特征具有重要影响,通过分析总结某路综合改造工程周边环境情况,综合考虑地面荷载的类型、大小、分布情况、变化情况以及与隧道围岩的相互作用关系,确定数值模拟中所需考虑的地面荷载情景,以确保模拟结果具有可靠性和准确性。本次研究主要考虑静荷载,模拟试验中依据实际情况考虑地面荷载大小分别为 1.5 MPa、1.7 MPa、2.0 MPa,作用形式为集中荷载与均布荷载两种情况,并考虑荷载作用的不同水平距离(0 m、20 m、40 m、60 m)。由于影响因素较多,为简化试验以及提高试验准确性,本次模拟试验采用正交试验设计方法^[12]。五因素三水平试验方案接近标准正交表 L16.4.5,故使用拟水平法进行处理,具体方案见表 1 及图 1。表 1 中因子 1 代表埋深,其中数字 1、数字 2、数字 3 分别代表深度 40 m、60 m、100 m;因子 2 代表断面,其中数字 1、数字 2、数字 3 分别代表矩形、拱形、半圆形;因子 3 代表荷载大小,其中数字 1、数字 2、数字 3 分别代表 1.5 MPa、1.7 MPa、2.0 MPa;因子 4 代表荷载分布形式,其中数字 1、数字 2 分别代表集中荷载、均布荷载;因子 5 代表水平距离,其中数字 1、数字 2、数字 3、数字 4 分别代表距中心 0 m、20 m、40 m、60 m。

试验方案部分示意图如图 1 所示。

2.2 模型参数选取及模型建立

根据实际案例及相关文献,本次模拟设置外边界长 150 m,宽 120 m。不同断面隧道尺寸如图 2 所示。模型采用 PHASE2D 进行建模,它是一款强大

表 1 正交试验具体方案

方案	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	2	3
4	1	1	2	1	4
5	2	1	2	2	4
6	2	2	1	1	3
7	2	3	2	1	2
8	2	1	3	2	1
9	3	1	3	1	2
10	3	2	2	2	1
11	3	3	1	2	4
12	3	1	2	1	3
13	3	1	2	2	3
14	3	2	3	1	4
15	3	3	2	1	1
16	3	1	1	2	2

的二维弹塑性有限元应力分析程序,可用于地下或地表岩石或土体的开挖模拟^[13-15]。本次模拟涉及地表问题,且属于浅层开挖,故本次模拟采用重力场,根据埋深不同,通过改变应力系数,保持水平应力不变,埋深 40 m 对应应力系数为 0.5,埋深 60 m

对应应力系数为 0.33,埋深 100 m 对应应力系数为 0.2。模型边界设置:左右边界固定 X 方向,底部边界固定 Y 方向,顶部设置为自由面。本次模拟材料参数选取如下:采用摩尔-库仑本构模型,单位重度 27 kN/m³,泊松比 0.3,弹性模量 50 MPa,内摩擦角 35°。

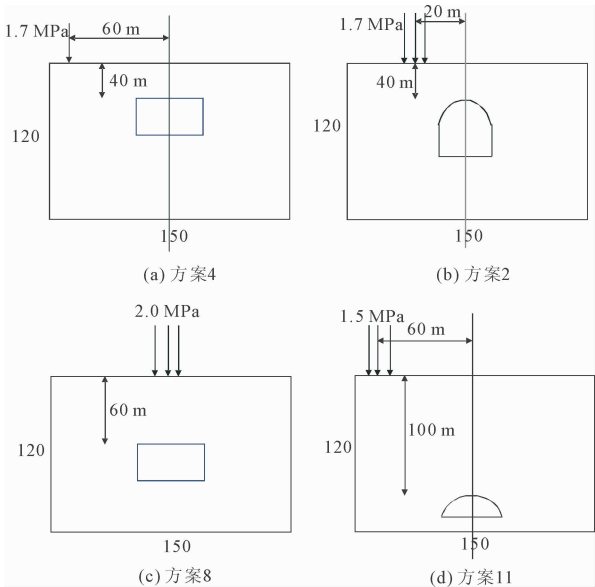


图 1 试验方案部分示意图

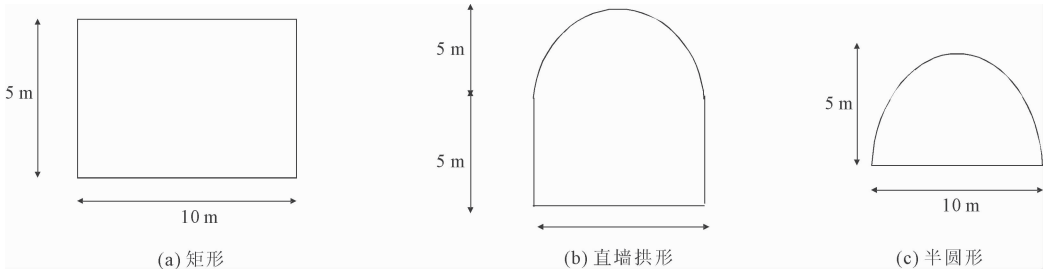


图 2 隧道断面示意图

3 模拟结果分析

3.1 模拟结果整体分析

以埋深 60 m、矩形断面、均布荷载 2 MPa 且荷

载作用位置距隧道中线 0 m 的工况为例进行分析。加载前后垂直应力云图及垂直应力曲线图如图 3、图 4 所示,通过图 3、图 4 可以看出,加载前后垂直应力 (σ_{yy}) 均从开挖区边缘向两侧逐渐增大,

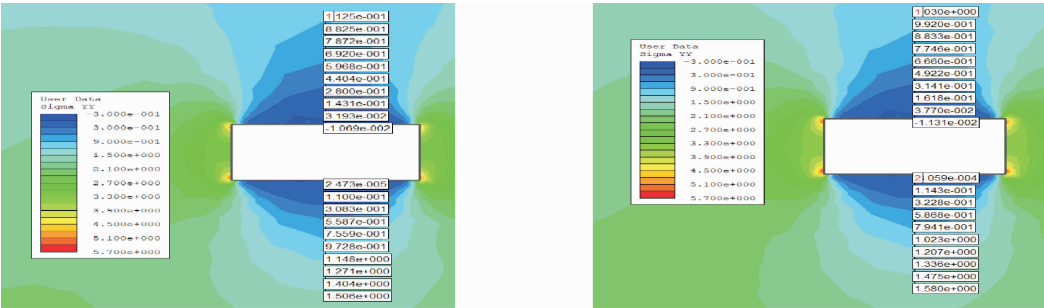


图 3 加载前后垂直应力云图

且变化幅度显著。加载后,垂直应力值明显增大,表明地面荷载对围岩应力分布产生了显著影响。加载前后位移云图和位移曲线图如图 5、图 6 所示,由图 5、图 6 可知,加载前后垂直位移 (Vertical Displacement) 均从开挖区边缘向两侧逐渐减小,开挖区边界

的垂直位移最大,且加载后垂直位移值显著增加。值得注意的是,开挖区上方的垂直位移明显大于开挖区下方,表明荷载作用对隧道顶部的影响更为显著。

加载前后强度因子云图和强度因子曲线图如图 7、图 8 所示,图 7、图 8 进一步揭示了围岩的稳定性

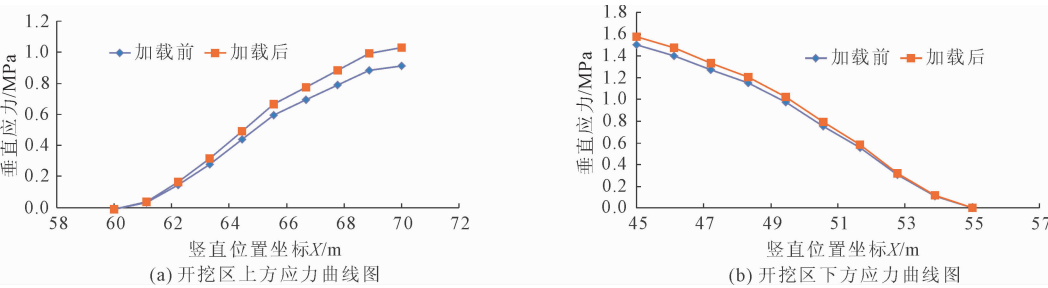


图 4 加载前后垂直应力曲线图

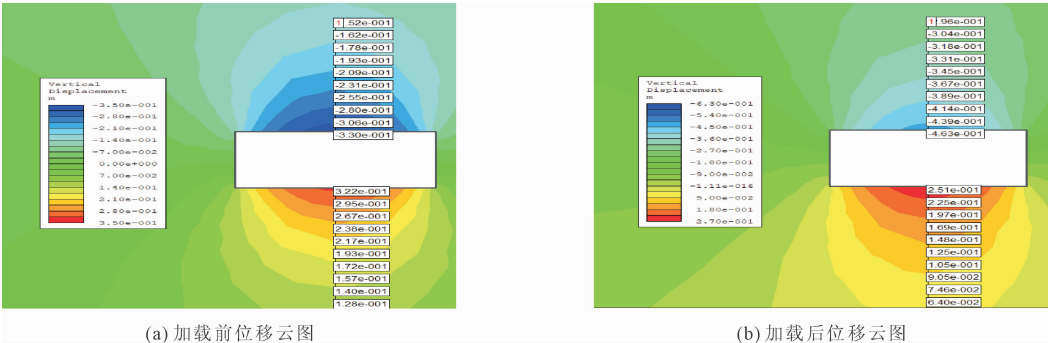


图 5 加载前后位移云图

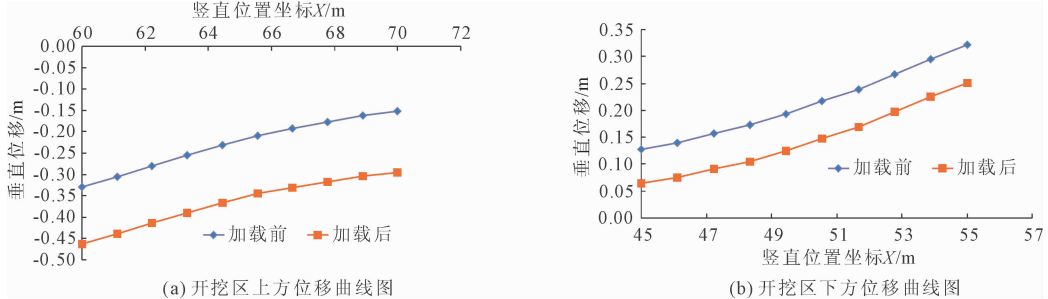


图 6 加载前后位移曲线图

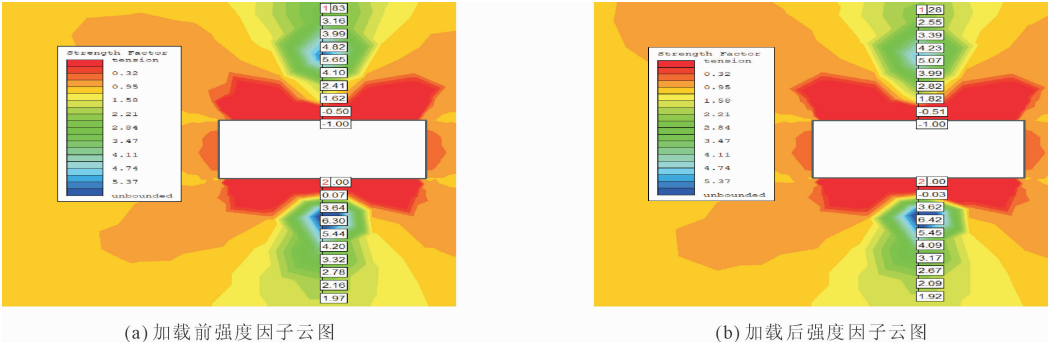


图 7 加载前后强度因子云图

变化。加载前后,强度因子(Strength Factor)均从开挖区边缘向两侧先增大后减小,开挖区上方及下方距开挖区边缘 4 m~6 m 处的强度因子最大,边界处强度因子最小。加载前强度因子普遍大于加载后,表明加载后围岩的安全裕度有所下降。强度因子是衡量材料在受力下安全裕度的重要指标,其值越大,表明材料的承载能力相对于实际应力的比值越高,结构越安全可靠。因此,加载后强度因子的降低提

示围岩在荷载作用下的稳定性有所减弱。

综上所述,地面荷载对隧道围岩的应力、位移及强度因子均产生了显著影响。荷载作用后,围岩的垂直应力和位移显著增大,强度因子降低,表明围岩的稳定性受到了一定程度的削弱。这一结果为进一步分析不同荷载条件下围岩的变形破坏特征提供了重要依据。

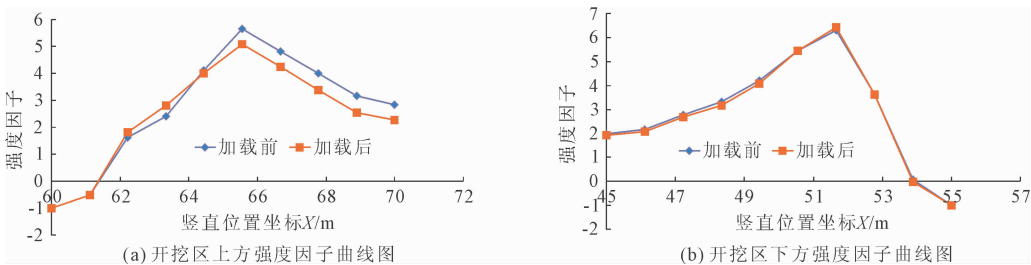


图 8 加载前后强度因子曲线图

3.2 正交试验结果分析

表 2 为隧道顶板垂直应力极差分析结果。本次模拟中,各因素 R 值大小排序依次为因子 1(埋深)、因子 2(断面)、因子 5(荷载水平距离)、因子 4(分布形式)、因子 3(荷载大小)。故除去开挖断面因素之外,从荷载角度看,荷载水平距离对垂直应力影响最大,其次是荷载分布形式,最后是荷载大小。

表 2 隧道顶板垂直应力极差分析结果						
项	水平	因子 1 (埋深)	因子 2 (断面)	因子 3 (荷载大小)	因子 4 (分布形式)	因子 5 (水平距离)
K 值	1	5.67	24.25	10.14	19.92	10.03
	2	8.64	8.02	20.51	21.07	10.6
	3	26.67	8.72	10.33	—	10.65
	4	—	—	—	—	9.70
K_{avg} 值	1	1.42	3.03	2.54	2.49	2.51
	2	2.16	2.01	2.56	2.63	2.65
	3	3.33	2.18	2.58	—	2.66
	4	—	—	—	—	2.43
最佳水平		1	2	1	1	4
R		1.92	1.02	0.05	0.14	0.24
水平数量		3	3	3	2	4
每水平重复数 r		5	5	5	8	4
折算系数 d		0.52	0.52	0.52	0.71	0.45
R'		2.23	1.19	0.06	0.29	0.21

注:“—”表示没有该水平数据。

在正交试验极差分析中,因素各水平平均值越大代表该因素在试验中对结果的影响越明显。通常

情况下,如果一个因素的各水平平均值越大,说明这个因素对试验结果的影响越强烈,因此在设计试验时需要考虑该因素的重要性和影响程度。因此,通过观察因素各水平平均值的大小,可以帮助更好地理解不同因素在试验中的作用和贡献,为进一步分析和研究提供重要参考。由表 2 可知,在本次模拟中,荷载越大对垂直应力影响越大,荷载形式为均布荷载时的影响大于集中荷载的影响,荷载水平距离为 40 m 时对垂直应力影响最大。

由表 2 中最佳水平分析可知,对垂直应力影响最小,也就是实际施工中最安全的组合为埋深 40 m,拱形截面集中荷载 1.5 MPa,荷载距中线为 60 m 时的情形。

表 3 为隧道顶板垂直位移的极差分析结果。本次模拟中,各因素 R 值大小排序依次为因子 1(埋深)、因子 2(断面)、因子 3(荷载大小)、因子 4(分布形式)、因子 5(荷载水平距离)。故除去开挖断面因素之外,从荷载角度看,荷载水平距离对垂直位移影响最大,其次是荷载大小,最后是荷载分布形式。由表 3 可知,在本次模拟中,荷载 2 MPa 对垂直位移影响最大,1.7 MPa 对垂直位移的影响不如 1.5 MPa 对垂直位移影响大;荷载形式为均布荷载时的影响大于集中荷载的影响;荷载水平距离为 0 m 时对垂直位移影响最大,其次是水平距离为 40 m 时的荷载,再其次是水平距离为 20 m,最后是 60 m。由表 3 中最佳水平分析可知,对垂直位移影响最小,也就是实际施工中最安全的组合为埋深 40 m,半圆形截

面,集中荷载 1.7 MPa 荷载距中线为 60 m 时的情形。

表 3 隧道顶板垂直位移极差分析结果

项	水平	因子 1 (埋深)	因子 2 (断面)	因子 4 (分布形式)	因子 3 (荷载大小)	因子 5 (水平距离)
K 值	1	0.99	5.06	4.55	3.03	3.15
	2	4.25	3.06	5.02	3.30	1.72
	3	4.33	1.44	—	3.23	3.13
	4	—	—	—	—	1.56
K _{avg} 值	1	0.25	0.63	0.57	0.76	0.79
	2	1.06	0.77	0.63	0.41	0.43
	3	0.54	0.36	—	0.81	0.78
	4	—	—	—	—	0.39
最佳水平	1	3	1	2	4	
R		0.82	0.41	0.06	0.39	0.40
水平数量	3	3	2	3	4	
每水平重复数 r	5	5	8	5	4	
折算系数 d	0.52	0.52	0.71	0.52	0.45	
R'	0.95	0.47	0.12	0.46	0.36	

注:“—”表示没有该水平数据。

4 结 论

本文分析了不同地面荷载条件下隧道围岩应力和位移分布规律,可以为城市隧道工程的设计、施工和既有隧道的保护提供重要的理论依据和实践指导。具体结论如下:

(1) 不考虑开挖断面因素,从荷载角度看,荷载水平距离对垂直应力影响最大,其次是荷载分布形式,最后是荷载大小;荷载水平距离对垂直位移影响最大,其次是荷载大小,最后是荷载分布形式。

(2) 荷载距离隧道中线越近对隧道围岩应力和位移影响越显著,其中 0 m 处垂直位移最大,40 m 处垂直应力峰值最大;均布荷载较集中荷载对围岩变形破坏更具威胁;相同条件下荷载越大,对隧道围岩变形破坏的影响程度越大。

(3) 隧道断面形状的影响:不同断面形状对围岩变形的影响不同,拱形断面在荷载作用下表现出较好的稳定性,尤其是在埋深较浅的情况下。

(4) 埋深的影响:埋深对围岩变形的影响显著,埋深越浅,地表荷载对围岩变形影响越大。埋深 40

m 时,围岩的变形和应力分布较为稳定,适合在实际工程中采用。

参考文献:

[1] 戴宏伟,陈仁朋,陈云敏. 地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究 [J]. 岩土工程学报, 2006(3):312-316.

[2] 吴 庆,杜守继. 地面堆载对既有盾构隧道结构影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(1): 57-66.

[3] 刘方琨,丁 云,朱崇钊. 新建建筑物对既有隧道的变形响应分析[J]. 工程建设,2013,45(5):25-28.

[4] 张万斌,曹林卫,刘保林. 拟建建筑施工对既有隧道稳定性影响分析[J]. 路基工程,2012(6):110-114.

[5] 闻 雁. 新建地表构筑物对某高铁既有隧道影响分析 [J]. 山西建筑,2021,47(5):146-147,166.

[6] 路德春,宋 涛,林庆涛,等. 盾构下穿施工既有隧道变形机理数值模拟研究[J/OL]. 防灾减灾工程学报, 2024: 1-14. [2025-04-15] <http://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20240328002>.

[7] 谭树增. 软土区基坑开挖对临近隧道及建筑的影响分析[J]. 江苏建筑,2024(2):84-88.

[8] 胡 垚,李明帅,郭 飞,等. 地铁行车荷载作用下地层和重叠隧道变形数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2023,45(S2):258-263.

[9] 刘 锦. 地面建筑荷载对下方既有隧道的影响分析 [J]. 价值工程,2023,42(11):151-154.

[10] 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.

[11] 张 会. 地面行车荷载作用下隧道(群)响应的研究 [D]. 淮南:安徽理工大学,2020.

[12] 罗明坤,宋丽强,李思齐,等. 动力扰动条件下巷道围岩变形规律研究 [J]. 煤矿安全,2025,56(3):157-166.

[13] 刘 卓,穆全平. 采用 PHASE2 软件的隧洞一次支护数值模拟与分析[J]. 水科学与工程技术,2024(1): 37-39.

[14] 李鹤鹤,冀宇鑫,宋高峰. 基于 PHASE2D 的充填开采工作面覆岩稳定性研究[J]. 山东煤炭科技,2022,40(6):168-171.

[15] 贾晶玺,于 奎,黄 勇,等. 基于 Phase2 软件的浅埋隧洞不同围岩自稳能力分析 [J]. 黑龙江水利科技, 2021,49(7):14-17,38.