道桥技术

车辆荷载作用下地铁隧道基坑变形规律研究

Research on Deformation Law of Subway Tunnel Foundation Pit under Vehicle Load

孟英杰[1]，唐谱峰[2]，徐冠豪[1]，陈新武[1]，李 娜[1]，刘玉星[2]

（1. 北京市政路桥股份有限公司，北京 100068；2. 北京科技大学 土木与资源工程学院，北京 100083）

摘 要：为探究临近既有道路上车速、车辆载重对深基坑开挖变形的影响，以紧临道路北京市地铁 3 号线地铁深基坑开挖为工程背景，采用有限元数值分析方法，研究了车速、车辆载重对深基坑车载侧地表沉降及地连墙水平位移的影响。结果表明：车速的变化对于地连墙水平位移的影响范围在距地表 0～6 m 范围内，且对地连墙墙顶的影响最为明显，当深度超过此范围后，不同车速下地连墙水平位移无明显差异；地表沉降最大值随着车速的增加而增加，但增大幅度随着车速的提升逐渐减弱，在车速 40～50 km/h 时影响最为明显。相较于车速变化，车辆载重的变化对地连墙水平位移的影响范围更大，车辆载重的影响程度显著大于车速，同时基坑地表沉降随着车辆载重的增加呈现出增大的规律。研究成果可为类似工程提供参考。

关键词：变形规律；车辆动荷载；车速；车辆载重

中图分类号：TU463 **文献标志码：**A **文章编号：**1005－8249（2025）03－0149－07

DOI：10.19860/j.cnki.issn1005－8249.2025.03.027

MENG Yingjie[1]，TANG Pufeng[2]，XU Guanhao[1]，CHEN Xinwu[1]，LI Na[1]，LIU Yuxing[2]

（1. Beijing Municipal Road Bridge Holding（Group）Co.，Ltd.，Beijing 100068，China；2. School of Civil and Resource Engineering，University of Science and Technology Beijing，Beijing 100083，China ）

Abstract：To explore the influence of vehicle speed and load on the deformation of deep foundation pits，this paper takes the excavation of a deep foundation pit for the Beijing Subway Line 3 adjacent to the road as the engineering background and uses the finite element numerical analysis method to study the influence of the above two factors on the surface settlement on the vehicle side and the horizontal displacement of the diaphragm wall. The results show that the influence range of vehicle speed on the horizontal displacement of the diaphragm wall is within 0～6 m from the ground surface，and the influence on the top of the diaphragm wall is the most obvious. When the depth exceeds this range，there is no significant difference in the horizontal displacement of the diaphragm wall under different vehicle speeds. The maximum surface settlement increases with the increase of vehicle speed，but the increase amplitude gradually weakens with the increase of vehicle speed. The influence is most obvious when the vehicle speed is 40～50 km/h. Compared to variations in vehicle speed，changes in vehicle load exert a more extensive impact on the lateral displacement of diaphragm walls. The influence of vehicle load is significantly greater than that of vehicle speed. Additionally，the surface settlement of foundation pits demonstrates an increasing trend proportional to the escalation of vehicle loads. The research findings could serve as a reference for analogous engineering projects.

Key words：deformation law；vehicle dynamic load；vehicle speed；vehicle load

作者简介：孟英杰（1989—），男，本科，工程师，研究方向：城市地下工程与空间施工技术。

收稿日期：2023－12－08

道桥技术

0 引言

随着城市化进程的加快与不断发展，城市地下空间中的轨道交通也同步快速发展，车辆荷载对于基坑稳定性的影响越来越受到重视[1-3]。很多情况下，城市地铁站会建在交通和人流量密集的区域。对于车辆荷载，其作用于基坑的过程中是随机、无规律可循的，因此研究车辆荷载对基坑开挖过程中的变形和受力规律具有重要的实用和理论价值。

邱洪志[4]研究车辆荷载对基坑变形和支撑体系受力的影响，总结了不同行车速度和不同荷载范围下基坑的变形特性；吴飞海[5]利用 Abaqus 有限元软件分析了基坑围护结构侧移、坑底隆起、地表沉降、支撑轴力等因素在车辆动力荷载影响作用下的变化规律；张义平[6]基于正弦半波动荷载模型，研究了不同车辆布置形式、不同车速和轴重等因素下交通荷载对基坑变形性状的影响规律，结果表明车辆动荷载只对浅层基坑结构产生影响，对于深层土体影响效果不明显；薛清伟等[7]通过 PLAXIS 3D 数值分析软件开展车辆荷载作用下软土深基坑变形性状研究，探索了深基坑变形在车辆荷载频率、荷载幅值、循环次数以及车－坑距等因素下的影响规律；Zhao 等[8]对某高速公路低路堤进行了动应力和振动响应现场测试，分析了路基中所存在的振动位移以及附加动应力，结果表明动应力和振动位移随交通速度和自重的增加而增大，随深度的增加而减小，原状土的临界循环应力比动剪应变大于扰动土；郑坚昭[9]采用拟静力模型，模拟分析了开挖时的卸荷效应和车辆行驶时的动荷载作用的影响，针对车辆超载对基坑变形的影响着重进行分析，总结了不同车辆荷载等效形式下的基坑变形规律；陈梅等[10]考虑到车辆的超载对软土地基的显著影响，针对不同载重的车辆简化成不同大小的车辆均布荷载，研究了不同载重下车辆荷载对软土地基的应力损伤程度；王旭东等[11]结合实测，考虑冲击系数，将车辆荷载简化为集中静荷载，根据四种施工方式对连续墙水平变形、建筑底板沉降、坑底隆起作了有限元分析；郭传创[12]利用 FLAC 3D 模拟了不同速度和重量的移动荷载对支护桩的位移和锚杆轴力的影响，结合实测数值，对考虑因素下的车辆荷载作用规律进行分析总结；潘杰麟[13]以 ANIDA 数值分析软件和现场监测分析，基于不同车速下的车辆振动频率研究了交通荷载特征和支护结构参数对基坑稳定性的影响，得出交通荷载对基坑稳定形影响主要是车辆振动对支护结构的作用；徐长节等[14]运用传统的半平面弹性地基梁设计法及三维有限单元模拟方法，分析了坑边超载以及车辆冲击荷载对既有基坑围护结构内力的不利影响。

综上，多数研究仅仅集中在将车辆动荷载简化成等效的静荷载来考虑对基坑的影响，而对车辆产生的动态交变应力波对基坑的变形演化规律的研究较少。以北京市地铁 3 号线紧临道路地铁深基坑为例，通过 MIDAS GTS NX 建立三维数值模型，分析车辆速度、车辆载重对基坑开挖时变形的影响，总结了相关工况下的基坑变形规律。可为类似紧临道路深基坑施工和设计提供参考依据。

1 工程背景

以北京地铁 3 号线东风站与东坝车辆段的 3 号线出入段线及部分 12 号线出入段线为例。地铁站地理位置及典型基坑剖面图如图 1 所示。

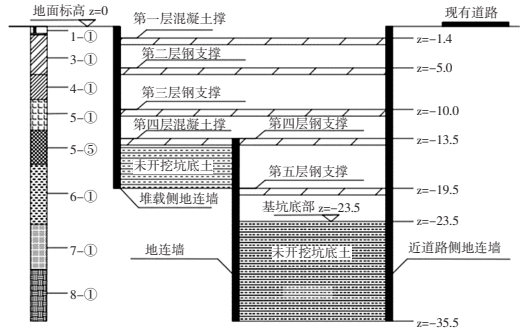


图 1 地铁站地理位置及基坑剖面图

Fig. 1 Metro station location and foundation pit profile

拟建场地旁有一条既有道路，道路距基坑的距离在 1～11 m 不等。在基坑的开挖过程中需要考虑车辆荷载作用对基坑变形的影响。该段地铁基坑开挖施工工况见表 1。

2 数值模拟

2.1 模型建立

基坑的计算模型如图 2 所示，尺寸为 180 m × 90 m × 60 m（长 × 宽 × 深）。为了保证计算结果的准确性，模型中各参数都依据基坑现场土体勘测报告

表 1　施工工况表

Table 1　Schedule of working conditions

施工工况	具体工艺
	初始应力场分析、位移清零
	地连墙、格构柱及冠梁施工
开挖－1	开挖至－1.4 m，架设第一道支撑
开挖－2	开挖至－5.0 m，架设第二道支撑
开挖－3	开挖至－10.0 m，架设第三道支撑
开挖－4	开挖至－13.5 m，架设第四道支撑
开挖－5	开挖至－19.5 m，架设第五道支撑
开挖－6	开挖至－23.5 m，坑底混凝土旋喷加固

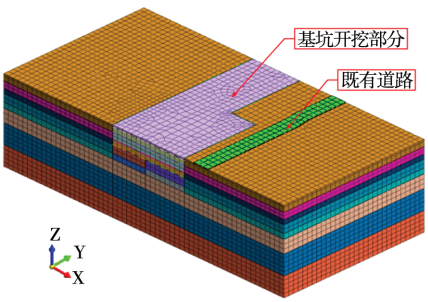


图 2　基坑三维模型图

Fig. 2　Foundation pit 3D model diagram

以及室内动三轴试验结果获取的数据并结合当地经验值进行取值。

2.2　车辆荷载取值

考虑到施工现场车辆的不同载重以及车辆行驶过程中的随机性，将车辆荷载等效为正弦波动荷载，以不同的车速、不同的车辆载重作为变量，分析车速和车辆载重对基坑开挖变形的影响。

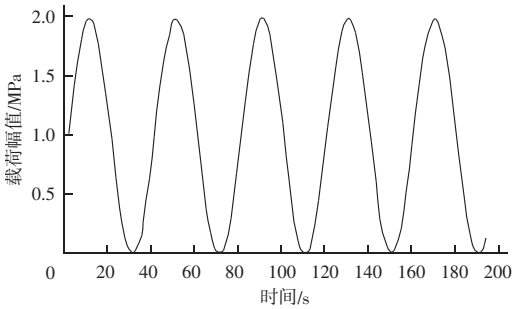
车辆荷载简化为正弦波动荷载公式为：

$$P(t) = P_0 + P\sin(\omega_0 t)$$
$$P = Ma\omega^2 \tag{1}$$

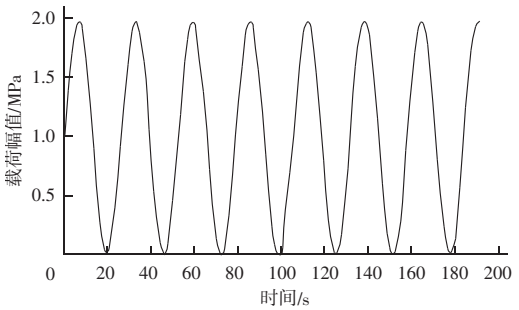
式中：P_0 为车辆静止荷载；P 为振动荷载幅值；M 为簧下质量；a 为道路情况的几何不平顺矢高；ω_0 为交通荷载振动角频率，$\omega_0 = 2\pi v/L$；v 为车辆行驶速度；L 为车身长度。

车速的增大会使车辆在行驶中与路面的冲击系数增大，进而增大对基坑的荷载效应，引起基坑变形增大[15]。因此设置车速为 30、40、50 和 60 km/h，基本涵盖了施工现场车辆行驶速度。将车辆荷载等效为正弦波动荷载，四种车速下荷载波形变化图如图 3 所示。

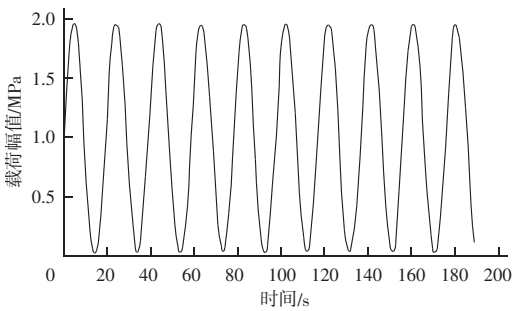
同时考虑到现场施工车辆的载重并不是一成不变，存在一定的超载可能，因此车辆载重也作为一个车辆荷载控制因素，设置 5 个不同的超载率。



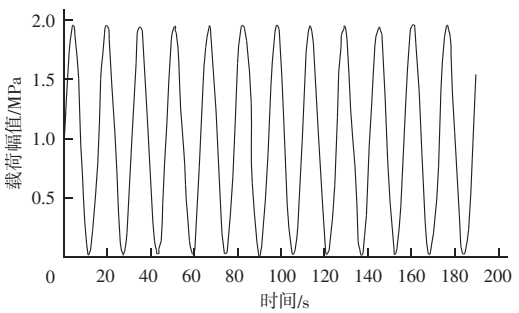
（a）30 km/h



（b）40 km/h



（c）50 km/h



（d）60 km/h

图 3　不同车速下的车辆荷载波形图

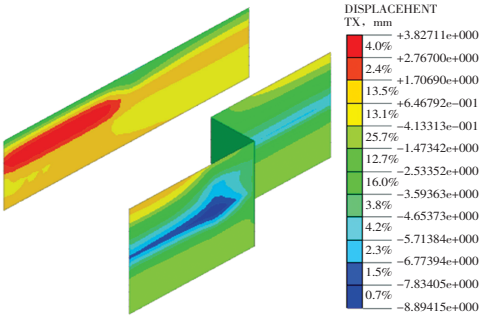
Fig. 3　Waveform diagram of vehicle load at different speeds

道桥技术

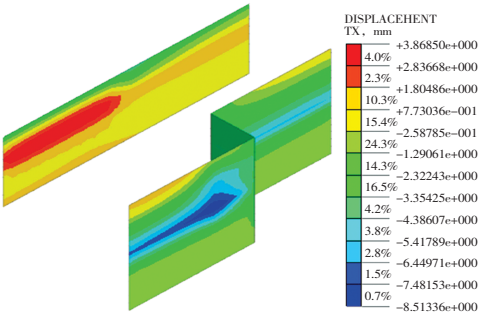
3 数值模拟分析

3.1 车速影响分析

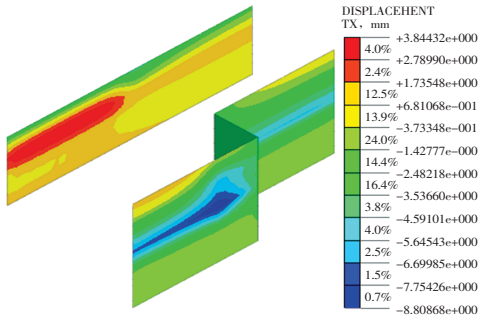
车速设置为 30、40、50 和 60 km/h，得到四种车速下的地连墙水平位移云图，如图 4 所示。



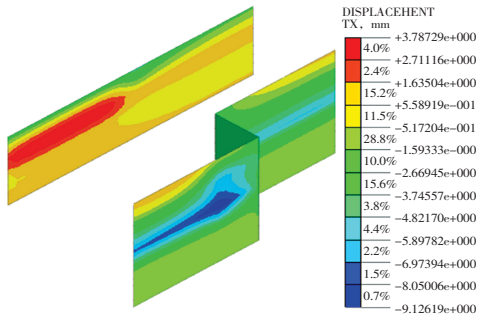
（a）30 km/h



（b）40 km/h



（c）50 km/h



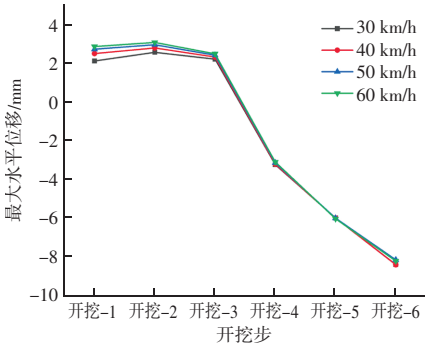
（d）60 km/h

图 4 不同车速下的地连墙水平位移云图规律

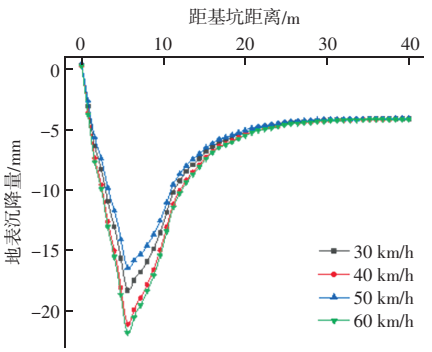
Fig. 4 Nephogram law of horizontal displacement of ground connecting wall at different speed

不同车速影响下，地连墙的最大水平位移均为距离地表 15 m 左右的深度，且最大水平位移随着车速的增加呈现先减小后增大的趋势。车速 40 km/h 时为最小值，最大水平位移为 8.513 mm；车速为 60 km/h 时达到最大值，最大水平位移为 9.126 mm，差值为 0.613 mm。由此，车速对于地连墙水平位移的影响较小。

地连墙水平位移在四种车速下随开挖深度的变化规律如图 5 所示。



（a）地连墙最大水平位移



（b）车载侧地表沉降

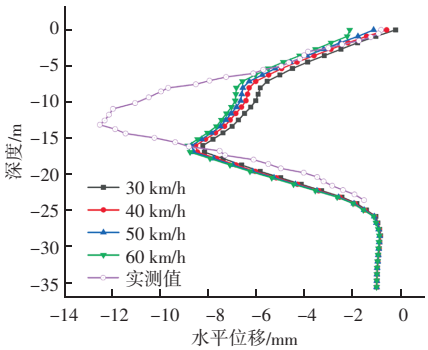
图 5 不同车速下的地连墙水平位移及车载侧地表沉降规律

Fig. 5 The horizontal displacement of ground connecting wall and the ground subsidence of vehicle side under different vehicle speed

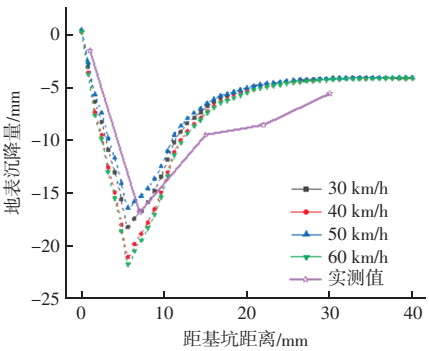
相较于深层地连墙，车速的增加对浅层地连墙的位移影响更大（深度 0～6 m）。车速从 30 增加到 40 km/h 后，地连墙最大水平位移差值为 0.165 mm，增幅为 7.18%；车速从 40 增加到 50 km/h 和从 50 增加到 60 km/h 时，地连墙最大水平位移增长幅度逐渐减小，且均小于 2.23%。对于车载侧地表沉降，车速为 30 km/h 时，坑外地表最大沉降量为 16.406 mm；车速为 40 km/h 时，最大沉降量为 18.247 mm，相较于 30 km/h 增加了 1.841 mm，增幅为 11.2%；车速为 50 km/h 时的最大沉降量为

21.065 mm，相对于前两种荷载工况分别增加 4.659 和 2.818 mm，分别增长 15.4% 和 28.4%；车速为 60 km/h 时的最大沉降量为 21.768 mm，相对于前三种荷载工况分别增加 5.362、3.521 和 0.703 mm，分别增长 32.7% 、19.3% 和 3.3%。车速为 40 到 50 km/h 时增长幅度最大，50 到 60 km/h 的增长率最低，可见车速对于地表沉降的影响在一定的速度范围内，对于该工程，对地表沉降影响最大的深度区间是 40 到 50 km/h 之间。

对不同车速下地连墙水平位移变形和地表沉降量与现场监测值对比如图 6 所示。车速为 30～60 km/h 时，地连墙的最大水平位移和地表沉降监测值演变趋势与现场监测值基本一致。车速为 60 km/h 时，模拟和监测结果的地连墙最大水平位移最接近，差值为 3.45 mm；车速为 50 km/h 时，模拟和监测值的地表沉降值差异最小，差值为 0.95 mm。整体上，车速对于地连墙的水平位移的影响较小，而对地表沉降值的影响较大，因此应参考地表沉降值控制车辆的车速。



（a）地连墙水平位移



（b）车载侧地表沉降

图 6　不同车速下地连墙水平位移变形和地表沉降量与现场监测值对比

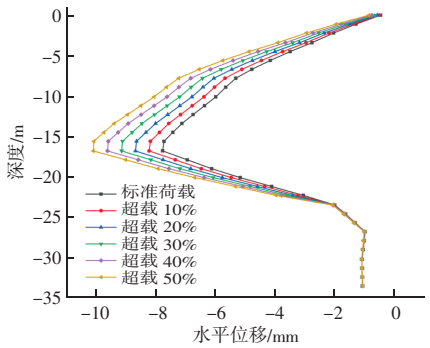
Fig. 6　Comparison of the horizontal displacement and deformation of the ground connecting wall and the surface settlement with the field monitoring values at different speed

3.2　车辆载重影响分析

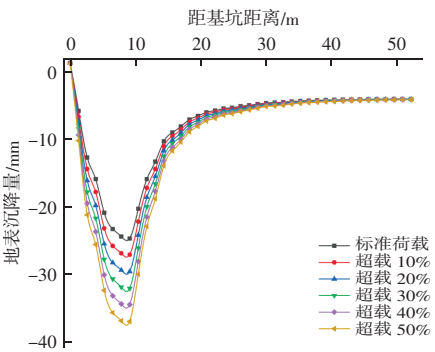
施工现场车辆的载重并不是一成不变的，为了探究车辆载重对于基坑变形的影响，同时考虑到超载现象的存在，设置标准荷载、超载 10%、20%、30%、40% 和 50%。不同车辆载重下基坑的塑性区分布的范围基本一致，坑底土体和围护结构四周的土体是主要的土体破坏区。随着车辆载重增加，车载侧基坑浅部土体的塑性破坏区域有扩大趋势，且既有车道下方土体的塑性破坏区域也逐渐增大，因此在现场施工过程中要尽可能杜绝车辆超载现象的发生，以免导致基坑土体的强度降低，产生塑性破坏，造成基坑失稳现象。

不同车辆载重下，基坑地连墙水平位移随深度变化规律和车载侧地表沉降随距基坑距离的变化规律如图 7 所示。

不同车辆载重下地连墙水平变形和车载侧地表沉降规律一致，二者均与车辆载重呈正相关关系。对于地连墙的水平位移，在标准荷载工况下最大水



（a）地连墙水平位移



（b）车载侧地表沉降

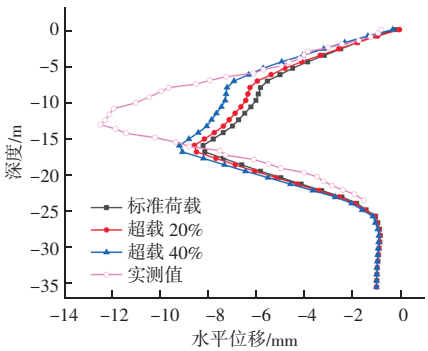
图 7　开挖完成后不同载重下的地连墙水平位移及车载侧地表沉降规律

Fig. 7　The horizontal displacement of ground connecting wall and the surface settlement of vehicle side under different load after excavation

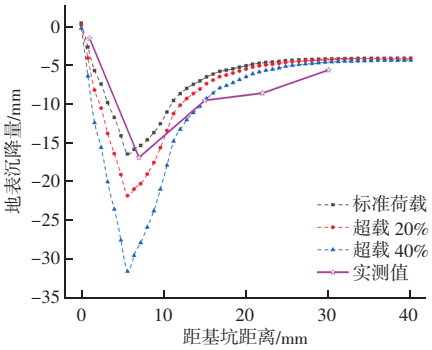
平位移为 7.769 mm；超载 10% 时，最大水平位移为 8.220 mm，相较于标准荷载增大 5.7%；超载 20% 时，最大值为 8.677 mm，相较于标准荷载增大 11.7%；超载 30% 时，水平变形最大值为 9.140 mm，相较于标准荷载增大 17.6%；超载 40% 时，地连墙最大水平位移值为 9.609 mm，相较于标准荷载增大 23.7%；车辆载重为 1.5 倍标准荷载时，最大水平位移为 10.085 mm，相较于标准荷载增大 29.8%。同时，车辆荷载的改变对地连墙水平位移的影响深度范围在距地表 0～15 m 范围内。因此实际工程中要加强对此深度范围内地连墙变形和受力的监测，以免发生基坑失稳现象。

对于车载侧地表沉降，坑外地表最大沉降位移也随着载重的增大而增大，分别为 27.2、29.7、32.2 和 34.6 mm，相较于标准荷载分别增大 9.7%、19.8%、29.8% 和 39.5%。与地连墙水平位移相比，车辆荷载的增加对于车载侧地表沉降的影响更大，且在超载 40% 和 50% 时，地表沉降量均大于规范允许值，因此要杜绝现场超载超重现象，保证基坑的安全稳定。

对不同车辆载重下地连墙水平位移变形和地表沉降量与现场监测值如图 8 所示。标准荷载～超载 50% 时，地连墙的最大水平位移和地表沉降监测值演变趋势与现场监测值基本一致。标准荷载下，模拟和监测结果的地连墙最大水平位移和地表沉降监测值差值分别为 4.97 和 0.56 mm。车辆荷载对与地表沉降的影响大于对地连墙的最大水平位移的影响。总体上，车辆载重需要控制为标准荷载，才能使基坑的变形整体控制在安全范围内。



（a）地连墙水平位移



（b）车载侧地表沉降

图 8 不同车辆载重下地连墙水平位移变形和地表沉降量与现场监测值对比

Fig. 8 Comparison between the horizontal displacement and deformation of the ground connecting wall and the surface settlement under different vehicle loads and the field monitoring values

4 结论

以紧临道路地铁深基坑为背景，探究了车速、车辆载重对基坑变形特性的影响，通过数值模拟方法进行分析，主要得到以下结论：

（1）相较于较深处地连墙，车速的增加对浅层地连墙的位移影响更大（深度 0～6 m）；同时车速对于地表沉降的影响在一定的速度范围内，对于本工程，对地表沉降影响最大的深度区间是 40 到 50 km/h 之间。

（2）不同车辆载重下地连墙水平位移和车载侧地表沉降规律一致，二者均与车辆载重呈正相关关系。超载率增加 10%、20%、30%、40% 和 50% 时，地连墙水平位移分别增大 5.7%、11.7%、17.6%、23.7% 和 29.8%；车载侧地表沉降则分别增加 9.7%、19.8%、29.8% 和 39.5%。因此，需要着重考虑和控制车辆荷载的大小，以保证基坑施工的安全性。

参 考 文 献

[1] 黄旭峰，张廉祥，马发发，等. 交通荷载作用下邻近地铁车站深基坑施工数值模型研究［J］. 科技通报，2022，38（10）：79－84.

[2] 张兴周，陈江，万励，等. 交通荷载及其对紧邻基坑支护结构影响的现场实测分析［J］. 地震工程学报，2020，42（2）：490－497.

[3] 唐丽云，邱培勇，叶万军，等. 车辆荷载对基坑支护结构的影

响分析［J］. 铁道标准设计，2015，59（8）：122－126.
［4］ 邱洪志. 交通荷载作用下基坑支护结构受力变形分析［D］. 郑州：郑州大学，2012.
［5］ 吴飞海. 考虑车辆动力作用的地铁深基坑施工过程扰动位移特性［D］. 上海：上海交通大学，2017.
［6］ 张义平. 交通荷载作用下基坑变形性状研究［D］. 杭州：浙江工业大学，2018.
［7］ 薛清伟，苟学登，杨琛，等. 车辆荷载作用下邻近软土深基坑动力响应研究［J］. 科技通报，2022，38（8）：92－95，117.
［8］ ZHAO J，LIU S，SHI M，et al. Experimental study on dynamic response of low embankment under traffic load［J］. Journal of Southeast University（Natural Science Edition），2007（5）：921－925.
［9］ 郑坚昭. 复杂荷载作用下软土基坑变形特性研究［D］. 广州：暨南大学，2011.
［10］ 陈梅，郑坚昭，莫玮宏，等. 车辆超载作用下软弱基坑变形特性研究［J］. 地下空间与工程学报，2014，10（3）：539－546，565.
［11］ 王旭东，李林，柳献，等. 盖挖施工荷载确定方法及邻近建筑结构变形分析［J］. 地下空间与工程学报，2009，5（增刊2）：1675－1680.
［12］ 郭传创. 深基坑结构变形特征实例与分析［D］. 合肥：合肥工业大学，2010.
［13］ 潘杰麟. 车辆移动荷载作用下基坑支护桩—土相互作用研究［D］. 武汉：武汉理工大学，2011.
［14］ 徐长节，陈金友，郭鲁军，等. 交通动荷载对基坑围护结构的影响分析［J］. 岩土工程学报，2013，35（增刊2）：884－887.
［15］ 冯阵图，李达. 砂卵石深基坑支护嵌入比安全优化研究［J］. 中国安全科学学报，2021，31（1）：125－131.

（上接第 148 页）

［10］ 王红旗，李栋伟，钟石明，等. 石灰改良红黏土导热系数影响因素及模型预测［J］. 科学技术与工程，2023，23（5）：2084－2092.
［11］ 许海亮，朱万宇，谭安福，等. 石灰改良高液限土路基路用性能研究［J］. 国防交通工程与技术，2023，21（2）：32－35.
［12］ 龚锦林，柳厚祥，王真. 石灰改良膨胀土压缩特性及力学特性研究［J］. 交通科学与工程，2022，38（4）：35－40.
［13］ 滕琴. 石灰改良膨胀土路基施工技术研究［J］. 交通建设与管理，2023（3）：126－127.
［14］ 刘俊，孙树林. 掺硫酸渣、石灰改良红黏土的室内试验研究［J］. 西部资源，2023（6）：91－94.
［15］ 杜文博，刘磊，拾亭，等. 考虑压实度、掺灰量及养护龄期的石灰土强度经验预估公式［J］. 土工基础，2023，37（6）：998－1002.
［16］ 卢瑞峰. 改良低液限黏土在高速公路路基施工中的应用［J］. 工程建设与设计，2023（21）：95－97.