文章编号:2096-5052(2026)03-0102-13　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.10

循环动载作用下盾构隧道变间距并行下穿既有公路隧道长期沉降研究

何家成[1,2],朱驰[3],傅金阳[3*],孙前辉[3],李亚楠[4]
(1.中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;
2.水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430063;
3.中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 4.黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:为揭示列车循环动载作用下新建盾构隧道并行下穿既有公路隧道的长期沉降规律,实现对既有隧道结构安全的准确分析评估。以济南轨道交通 M2 线穿黄隧道为工程依托,通过室内动三轴试验获取土体动力变形参数,构建适配本工程的土体累计塑性变形沉降分析模型;采用动力有限元数值模拟方法,系统分析不同隧道净距条件下地层动应力分布特征及既有公路隧道长期沉降响应规律。模拟结果显示,动载影响下地层动应力主要集中于新建盾构隧道底部 10 m 范围内,达到地层动应力变化量的 60%~70%;既有公路隧道沉降随并行隧道间距增大呈上升趋势,汽车动载贡献占比表现为先增大后减小的变化特征;基于多组工况计算结果,拟合得到循环荷载作用下盾构隧道变间距并行下穿既有公路隧道的沉降量与隧道净距的定量关系式。所建立的分析模型与拟合公式可直观反映隧道间距对长期沉降的控制作用,相较于常规经验方法更贴合近距离并行隧道工程场景,能够为同类盾构下穿施工的长期沉降分析与安全控制提供更具针对性的理论依据与计算方法。

关键词:循环动载;室内试验;数值模拟;长期沉降;并行下穿隧道
中图分类号:U43　　**文献标志码**:A

引用格式:何家成,朱驰,傅金阳,等. 循环动载作用下盾构隧道变间距并行下穿既有公路隧道长期沉降研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(3):102-114. He Jiacheng, Zhu Chi, Fu Jinyang, et al. Study on long-term settlement of shield tunnels parallelly undercutting existing highway tunnels with variable spacing under cyclic dynamic loading[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):102-114.

Study on long-term settlement of shield tunnels parallelly undercutting existing highway tunnels with variable spacing under cyclic dynamic loading

He Jiacheng[1,2], Zhu Chi[3], Fu Jinyang[3*], Sun Qianhui[3], Li Yanan[4]
(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China;
2. National and Local Joint Engineering Research Center for Underwater Tunnel Technology, Wuhan 430063, Hubei, China;
3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;
4. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China)

Abstract: To reveal the long-term settlement behaviour of an existing highway tunnel caused by a newly constructed shield tunnel passing beneath it in parallel under cyclic train loading, the Yellow River Crossing Tunnel of Jinan Rail Transit Line M2 was taken as the engineering background. Soil dynamic deformation parameters were obtained through laboratory dynamic triaxial tests, and a cumulative plastic deformation-based settlement model was established. Dynamic finite element simulations were then conducted to analyse the ground dynamic stress distribution and the long-term

收稿日期:2026-04-21;**修回日期**: 2026-05-31; **接受日期**:2026-06-23;**出版日期**:2026-09-20
基金项目:济南城市建设集团有限公司科技开发计划资助项目(2020W003);中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究资助项目(TSYSDY-JLLCHSD[2020]-11)
第一作者简介:何家成(1995—),男,湖南郴州人,工程师,硕士,主要研究方向为地下与隧道工程。E-mail: 007179@crfsdi.com
*通信作者简介:傅金阳(1985—),男,湖南湘乡人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为基础设施灾变机制及智能检测。
E-mail: jy.fu@csu.edu.cn

settlement response of the existing highway tunnel under different tunnel clear spacings. The results showed that the ground dynamic stress was mainly concentrated within 10 m beneath the newly constructed shield tunnel, accounting for approximately 60%~70% of the total dynamic stress variation. The settlement of the existing highway tunnel increased with tunnel spacing, while the contribution of vehicle dynamic loading first increased and then decreased. Based on multiple working conditions, a quantitative relationship between tunnel clear spacing and long-term settlement was fitted. The proposed model and fitted formula reflected the controlling effect of tunnel spacing on long-term settlement and provided a targeted method for settlement prediction and safety assessment in similar shield tunnelling undercrossing projects.

Keywords: cyclic dynamic load; indoor test; numerical simulation; long term settlement; parallel underpass tunnel
Received: 2026-04-21; **Revised**: 2026-05-31; **Accepted**: 2026-06-23; **Published**: 2026-09-20

0　引言

随着城市现代化建设推进,地铁隧道已成为城市轨道交通体系的重要基础设施,地铁隧道在长期运营过程中不可避免地受到列车循环荷载的持续作用。长期循环动载影响下,隧道周围土体会逐渐累积塑性变形,引起隧道结构的非预期沉降,对结构安全及运营稳定性产生不利影响[1-2]。

目前大多数长期沉降的计算方法是基于 MONISMITH 提出的指数模型[3],但该模型存在着模型参数离散性大,变形预测精度低等问题。针对这一技术难题,国内外相关学者已开展大量针对性研究和改进探索。理论模型改进方面,Li 等[4] 对 MONISMITH 指数模型进行改进,提出修正 Power 模型;Chai 等[5] 在修正 Power 模型的基础上引入初始静偏应力,对模型进行修改和完善;后续研究中则进一步细化影响因素,黄茂松等[6] 引入相对偏应力水平的概念,建立考虑动、静偏应力耦合作用的模型;魏星等[7] 纳入土体静强度因素,构建综合考虑动、静偏应力与土体静强度耦合效应的预测模型,拓展模型适用范围。沉降预测研究方面,结合不同工程场景,形成了力学-经验法、数值模拟法、试验拟合与公式结合等多种技术路径。高广运等[8] 基于修正动偏应力计算模型,并结合分层总和法预测交叉隧道的长期沉降规律;彭红霞等[9] 通过数值模拟,结合经验公式预测交叠隧道的长期沉降量;刘维正等[10] 基于力学-经验法,合理预测结构性软土路基长期运营沉降;王加辉等[11] 则依托实际工程,采用数值模拟三线近距并行盾构隧道掘进土体变形,并对施工条件做敏感性分析;杨兵明等[12] 通过室内三轴试验拟合得到修正指数预测模型中的相关参数,结合动力响应数值分析对盾构隧道的长期沉降进行预测;刘汝辉等[13] 建立数值分析模型,揭示不同净距下后行隧道掘进时先行隧道的位移和管片内力规律;Zhou 等[14] 基于软黏土地区四座重叠隧道的案例,用有限元法(I-EM)和经验法研究了隧道-地面系统的动态响应和隧道的长期沉降特性。

上述研究为盾构隧道长期沉降预测提供了坚实的理论基础与技术支撑,但随着城市地下空间持续开发,新建盾构隧道并行下穿既有公路隧道的工程场景日益增多。此类工程的沉降问题呈现出更为复杂的特征,与交叉隧道和重叠隧道相比,新建盾构隧道并行下穿既有公路隧道具有更加复杂的空间关系和受力特征。在该工况下,新建隧道与既有隧道之间的净距沿线路方向不断变化,同时既有隧道结构会对土体动力响应及变形累积产生显著影响。目前针对循环动载作用下变间距并行下穿既有隧道的长期沉降问题研究仍相对较少,相关方法尚不完善。因此,亟需对该问题开展进一步研究。

为此,本研究依托济南轨道交通 M2 线穿黄隧道工程,开展饱和软黏土在循环动载作用下的室内动三轴试验,建立适用于本工程条件的累积塑性变形沉降计算模型;在此基础上,结合 ABAQUS 建立三维有限元动力响应分析模型,研究循环荷载作用下盾构隧道变间距并行下穿既有公路隧道的动力响应特征,并进一步分析隧道长期沉降值与隧道净距之间的拟合参考关系,以期为类似城市轨道交通隧道工程的运营维护与安全评估提供理论依据和工作参考。

1　循环荷载作用下饱和软黏土累积应变特性室内试验研究

1.1　试验取样与制备

本研究中试验所用土体均取自济南济泺路穿黄隧道项目北岸明挖合建区间,根据地勘资料,各地层土体基础物理性质接近,以粉质黏土为主,整体呈褐黄色、灰黄色,局部黏粒含量较高。选取北岸近河堤位置处土样进行后续室内土工试验,土样尺寸 200 mm×110 mm。取样过程如图 1 所示。



(a) 原状土样密封封装



(b) 岩芯土样整理陈列

图 1 济泺路穿黄隧道现场取样

Fig.1 On site sampling of Jilong Road crossing Yellow River Tunnel

取得土样后,按照文献[15]规定制备重塑淤泥质软黏土,具体制备和加载过程为:风干、碾碎、过筛、烘干、加水、分层击实、饱和、固结、加载。其中,试样采用真空饱和联合反压饱和方式,饱和度控制在 95%以上。土体采用 $K_0=1$ 等向固结,固结完成标准为 1 h 内体积变形小于 0.1 mL;在 100 kPa 围压下,试样固结时间不小于 24 h,以确保主固结完成。制备试样直径为 39.1 mm,高 80 mm,其主要物理技术指标和静三轴强度指标见表 1。

表 1 主要地层基本物理性质指标

Table 1 Basic physical property indicators of main strata

天然含水率/%	密度/(g·cm^{-3})	干密度/(g·cm^{-3})	孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
25	1.98	1.59	0.705	29.03	26.01	6.24

室内试验使用的仪器为 DDS-70 动三轴仪,采用正弦波形模拟地铁列车循环荷载,加载频率取 1.0 Hz,可较好反映实际交通荷载特征。结合济泺路穿黄隧道工程实际地层应力条件,试验围压取工程典型值 100 kPa,对应埋深约 5~11 m 范围内软土层的侧限应力水平。动应力幅值的选取主要依据车辆循环荷载作用下隧道周边土体的动应力水平确定。根据现场车辆荷载条件及隧道周边土体受力特征,隧道周边土体动应力大致处于 70~120 kPa 范围内。因此,本研究选取 70、100 和 120 kPa 作为动三轴试验动应力幅值,分别表征较低、典型和较高动应力水平,以反映不同车辆荷载作用下土体的动力变形特征。具体动三轴试验方案如表 2 所示。

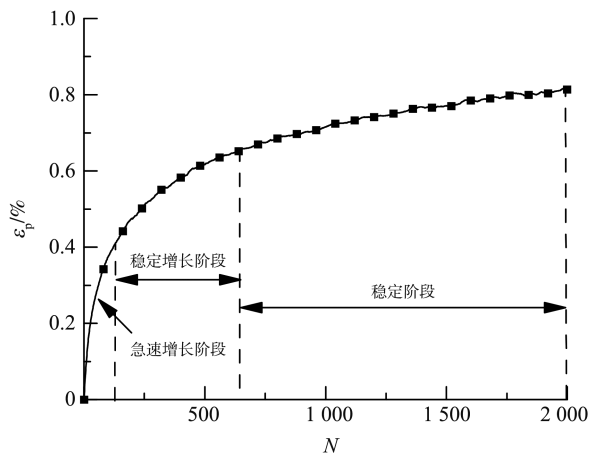
表 2 动三轴试验方案

Table 2 Dynamic triaxial test plan

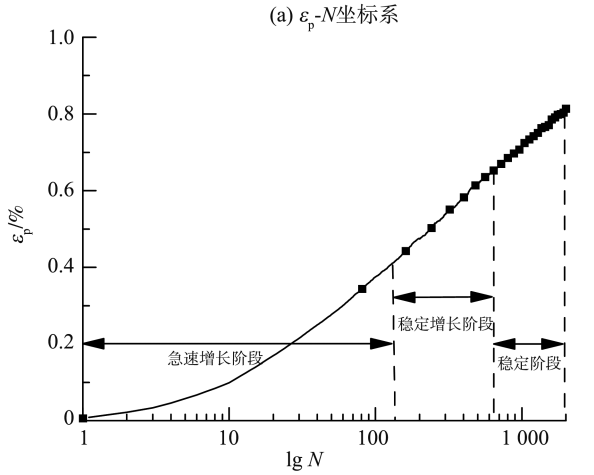
波形	频率/Hz	动应力/kPa	围压/kPa	静偏应力/kPa	加载振次
偏压正弦波	1	70	100	70	2 000
		100	100	100	2 000
		120	100	120	2 000

1.2 试验结果分析

循环荷载作用下土体累积塑性变形按照变形曲线的最终走势特征可分为稳定型、破坏型和临界型三种[9,16-17]。图 2 为围压 100 kPa,动应力幅值 100 kPa时土体累积塑性变形曲线,图 2(a)展示循环次数 N 与应变 ε_p 关系,图 2(b)横坐标为对数坐标,展示循环次数与应变关系,由此可以看出其符合稳定型变形曲线的特征。在高速铁路和地铁工程等实际工程中,土体所承受的动应力幅值基本小于土体的临界动应力,因此本次只分析稳定型累积塑性应变曲线。根据文献[18],可大致将其划分为 3 个发展阶段,即急速增长阶段(0 ~ 50%)、稳定增长阶段(50% ~ 80%)和稳定阶段(80% ~ 100%)。由图 2 可知:土样在循环加载 0 ~ 130 时,其累计塑性应变随加载次数急剧增大;在 $N=130\sim645$ 时,土样累计塑性应变增长速率有了很大程度的衰减;在 $N=645\sim2\,000$ 范围内,土样的累计塑性应变基本保持稳定,其增长速率也维持在较小范围内。



(a) ε_p-N坐标系



(b) ε_p-lg N坐标系

图 2 土体累积塑性变形特征

Fig.2 Accumulated plastic deformation characteristics of soil

围压 100 kPa 下不同动应力幅值关系曲线如图 3 所示。由图 3 可知:不同轴压下土样累计塑性应变与总应变变化趋势基本一致。在振动初期的累积塑性应变均快速增长,振动后期累积塑性应变随振次的增长速率逐渐减小,说明在地铁列车运营初期软黏土地层的沉降量较大,随运营时间的增长土体逐渐压实,地层的沉降速率逐渐减小。其他条件相同时,土样累积塑性应变随动应力幅值的增大而增大,在实际工程中,在列车循环荷载作用下地层的沉降量随深度不断减小。

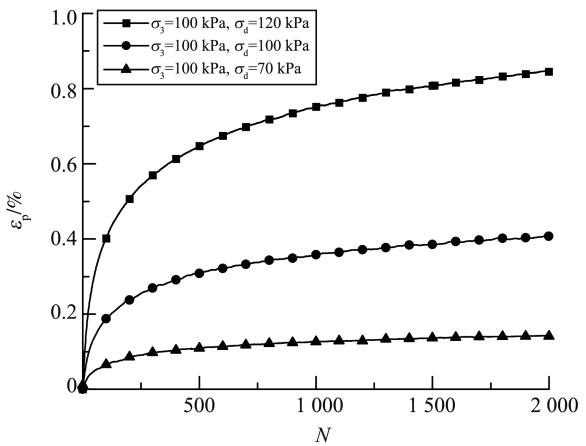


图 3　不同动应力幅值下 ε_p-N 关系曲线
Fig.3　ε_p-N relationship curve under different dynamic stress amplitudes

为预测列车循环荷载作用下地层的长期沉降,研究学者提出一系列的计算模型,本次拟采用魏星提出的累计塑性应变数学模型[7],其考虑了土体静强度、静偏应力及动偏应力的影响,可以较为准确地模拟出循环动载作用下土体的残余变形。

$$\varepsilon_p = a\left(\frac{q_d+q_s}{q_f}\right)^m q_d N^b, \tag{1}$$

式中:ε_p 为土体累积塑性变形;N 为循环加载次数;q_d 为循环荷载动偏应力;q_f 为土体静强度;q_s 为静偏应力;a、m、b 为模型常数,通过动三轴试验确定。

其中,土体的静强度 σ_f 可按下式进行计算

$$\sigma_f = \frac{2(c\cos\varphi+\sigma_c\sin\varphi)}{1-\sin\varphi}, \tag{2}$$

式中,c 为土体黏聚力,φ 为土体摩擦角。

参数 a、m、b 可按照以下方法进行确定。首先将式(1)两边取对数

$$\lg\varepsilon_p = \lg\left[aq_d\left(\frac{q_d+q_s}{q_f}\right)^m\right]+b\lg N。 \tag{3}$$

由式(3)可知,$\lg\varepsilon_p$ 和 $\lg N$ 呈线性关系,参数 b 为斜率,含有参数 a 和 m 的第 1 项为截距。假设第 i 组试验数据取对数后,截距为 K_i,则有

$$\lg\varepsilon_p = \lg\left[aq_d\left(\frac{q_d+q_s}{q_f}\right)^m\right]+b\lg N。 \tag{4}$$

由式(4)可知,K_i 与 $\lg[(q_{di}+q_{si})/q_{fi}]$ 呈线性关系,其中 q_{di}、q_{si} 和 q_{fi} 分别为第 i 组试验的循环荷载动偏应力、静偏应力和土体静强度;m 为该直线的斜率,$\lg(aq_{di})$ 为截距。

根据试验结果,对其进行数据拟合,得到参数分别为 $a=0.014\ \mathrm{MPa}^{-1}$, $b=0.318$, $m=2.334$。采用该参数模拟不同动偏应力下的试验数据如图 4 所示。模拟结果和试验结果较相符,说明本研究采用的模型可以较为合理的表征列车循环荷载作用下地层的长期沉降。

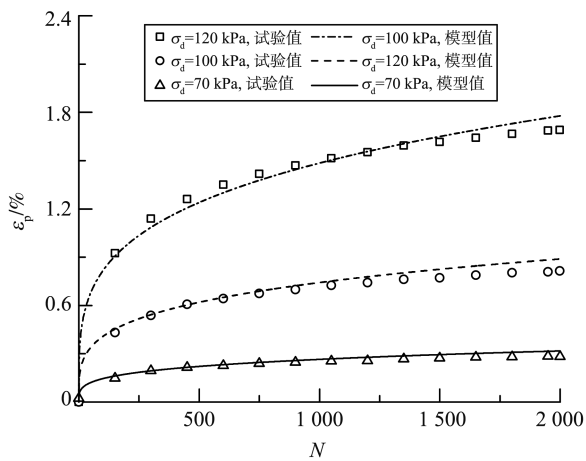


图 4　不同轴压下土体塑性累积应变的试验值和模型预测值
Fig.4　Experimental and model predicted values of plastic cumulative strain of soil under different axial pressures

2　循环荷载作用下变间距并行下穿既有公路隧道的长期沉降

2.1　工程概况

济南轨道交通 M2 线穿黄隧道区间段总长 3 184.4 m,包括南岸明挖合建区间 515.2 m、穿黄大盾构区间 2 519.2 m,北岸明挖合建区间 418.3 m。本研究研究的双线盾构隧道并行下穿先建明挖公路隧道工程位于济泺路穿黄隧道北岸明挖合建区间,如图 5 所示。

由于地铁隧道 M2 线与公路隧道分离之后,道路隧道底板以 4% 的斜率抬升,造成了北岸明挖暗埋段新旧隧道间净距逐渐增大的情况,双线盾构隧道并行下穿既有明挖公路隧道工程中,新建隧道与既有公路隧道之间的净距在影响结构长期沉降是重

要因素,且两隧道净距较小位置距离模型边界较近,在进行有限元分析时受截断边界影响较大,故本研究选取典型断面的方式进行研究。根据工程设计施工方案共选取 4 个典型断面,既有明挖公路隧道结构形式包括双层矩形框架结构和单层矩形框架结构,具体方案如图 6 所示。

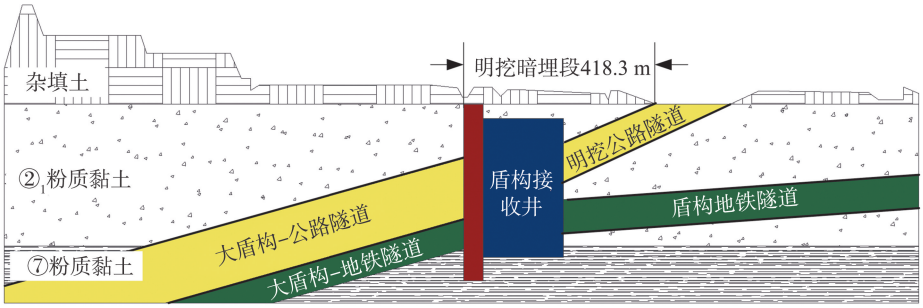


图 5 下穿段纵断面示意图

Fig.5 Schematic diagram of the longitudinal section of the underpass section

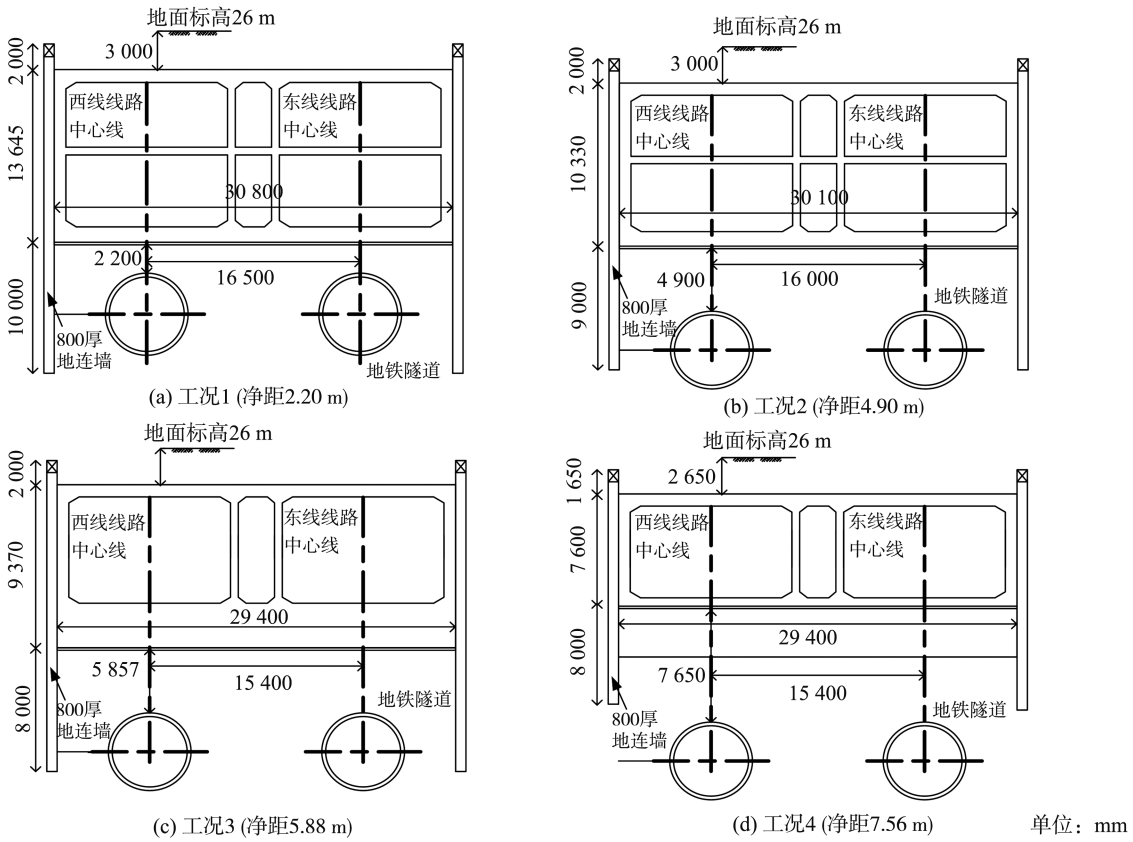


图 6 不同净距工况示意图

Fig.6 Schematic diagram of different clearance conditions

2.2 计算模型尺寸和参数选取

模型基于济南双线盾构隧道并行下穿既有明挖公路隧道工程典型断面建立,两隧道净距 2.20~7.56 m,隧道外径 6.4 m,内径 5.8 m,既有公路隧道型式如图 6 所示。模型包括地层、盾构隧道衬砌、既有明挖公路隧道、地下连续墙、道床、轨枕、扣件。模型中隧道衬砌、道床、轨道板及钢轨采用弹性本构,土体采用摩尔库伦本构。扣件设置为弹簧阻尼单元,刚度为 60 kN/mm,阻尼系数[16]为 50 kN·s/m。摩尔-库伦本构主要用于模拟车辆动荷载作用下隧道周边土体的应力分布及瞬时变形响应。考虑到该本构模型难以直接反映循环动载下土体长期累积塑性变形,本研究进一步结合动三轴试验结果,建立动应力幅值、循环次数与累积塑性应变之间的关系,并根据数值模型提取的隧道周边土体动应力水平计算长期累积变形,从而实现单元体试验结果与数值模型的耦合。模型各材料参数见表 3。

表 3　模型材料参数表
Table 3　Model material parameter table

地层或结构名称	密度/(kg·m^{-3})	静力压缩模量/MPa	等效动力模量/MPa	阻尼比	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
填土	1 786	10.0	30.0	0.06	0.40	18.05	20.10
黏质粉土	1 847	45.9	183.6	0.05	0.29	29.03	26.01
粉质黏土	2 000	61.1	305.5	0.05	0.35	25.40	20.70
明挖隧道	2 551	325 000.0		0.02	0.20		
隧道衬砌	2 551	34 500.0		0.02	0.20		
道床	2 551	31 500.0		0.02	0.20		
轨枕	2 551	31 500.0		0.02	0.20		
轨道	7 990	210 000.0		0.01	0.30		

为消除模型的尺寸效应,模型宽度为 100 m,竖向高度 60 m。对隧道周边区域网格密,远离隧道区域网格较疏,网格尺寸为 0.5 ~ 2.0 m。通过设置有限元-无限元耦合边界减小波在边界面的反射,无限元边界处质点运动的微分控制方程为

$$-\rho\ddot{\mu}+\frac{\partial\sigma}{\partial x}=0, \tag{5}$$

式中:ρ、μ、σ 分别为质点的质量密度、质点的加速度和应力。

模型各结构接触及结构与土体接触采用绑定约束,建立有限元模型如图 7 所示。

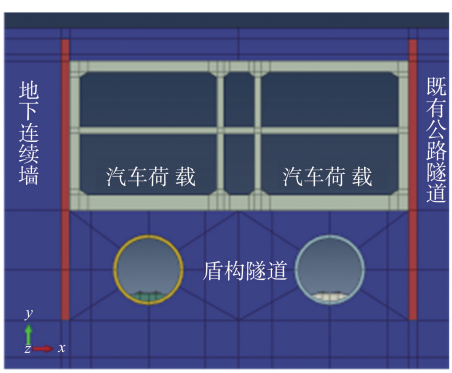


图 7　隧道有限元模型
Fig.7　Finite element model of tunnel

2.3　地铁列车及汽车荷载模拟

采用激振函数模拟地铁动载,该函数由列车静荷载和行驶产生的动荷载组成[19]。济南地铁采用 4 动 2 拖 B 型列车,单边车轮静载 $A_0=70$ kN,车簧下质量 $m=750$ kg,运营车速取 72 km/h。根据表 4 英国轨道几何不平顺管理值,取得 3 种不平顺条件下的振动波长和矢高分别为:$L_1=10$ m, $a_1=4$ mm; $L_2=2$ m, $a_2=0.5$ mm; $L_3=0.5$ m, $a_3=0.08$ mm。所选取的轨道不平顺波长与矢高参数,与我国城市轨道交通运营线路的轨道不平顺管理标准基本一致,能够合理反映正常运营条件下地铁列车的实际振动水平。

表 4　英国轨道几何不平顺管理值
Table 4　UK track geometry roughness management value

影响因素	波长/m	矢高/mm
行车平稳性(Ⅰ)	50.00	16.000
	20.00	9.000
	10.00	5.000
作用到线路上的动力附加荷载(Ⅱ)	5.00	2.500
	20.00	0.600
	1.00	0.300
轨面波形磨耗(Ⅲ)	0.50	0.100
	0.05	0.005

列车和汽车单车轮荷载时程曲线如图 8 和图 9 所示。

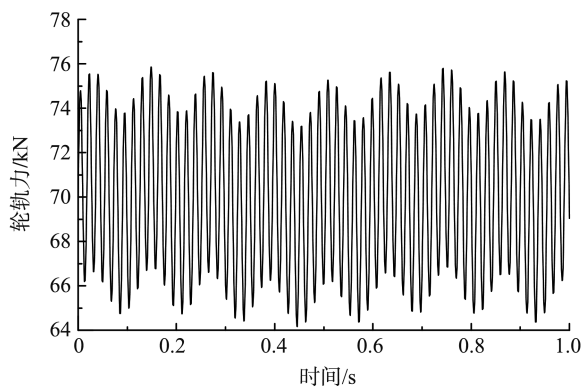


图 8　列车单车轮荷载时程曲线
Fig.8　Time history curve of single wheel load on a train

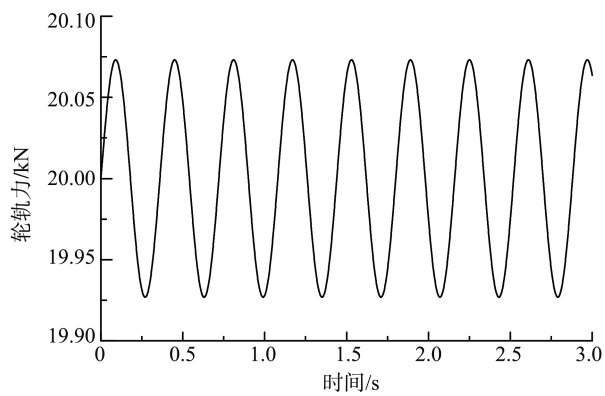


图 9　汽车单车轮荷载时程曲线
Fig.9　Time history curve of single wheel load for automobiles

张艳美等[20]认为在路面性能、路表状况、车辆构造、车速等条件一定的情况下，路面不平顺是汽车动载的主要因素，提出一种简单、反映振动周期、反映几何不平顺的经验公式来反映汽车动载。该经验公式适用于城市道路、高速公路等常规刚性或半刚性路面条件，可用于中等行车速度下城市隧道、公路隧道等交通工程的汽车动荷载模拟。济泺路穿黄隧道为城市公路隧道，路面结构条件与常规城市道路及隧道路面相近，设计行车速度为 60 km/h，属于中等行车速度范围，车辆动载主要受路面不平顺及车辆周期振动影响，与该经验公式的基本假设相符。

$$F(t)=P_0+P\sin(\omega t), \tag{6}$$

式中：P_0 为车轮静载；t 为时间；P 为振动荷载幅值，$P=M_0a\omega^2$，M_0 为簧下质量，a 为几何不平顺矢高，反映了路况，ω 为振动圆频率。圆频率计算式为：$\omega=2\pi v/L$，v 为汽车的运行速度，L 为几何曲线的波长。

汽车动载单边静轮重 $P_0=20$ kN，簧下质量取 $M_0=120$ kg，$a=2$ mm（国际高速公路平整度指数）；$v=60$ km/h；两轮轴中心间距 1.8 m。汽车单车轮荷载时程曲线如图 9 所示。项目穿黄河段北岸以地面形式穿越龙湖后，上跨 G309、邯济铁路，与坝顶路、G308 平交。基于上述各特征年限的总体交通需求分析，预测项目各特征年交通流量如表 5 所示。

根据预测结果，未来 30 年内平均双向车流量约 40 000 pcu·d^{-1}，济南地铁每天运营时间为 6:00 ~ 22:00，平均每 7 min 一班，每天 140 班次，则每年地铁运行约 50 000 次。表 5 中交通流量为标准小客车当量交通量。本研究将单次车辆通过计算断面视为一次汽车动载循环，则汽车年荷载循环次数可按 $N_v=365Q$，汽车荷载年循环次数约为 1.46×10^7 次；若按单向车流量折算，则约为 7.30×10^6 次/年，均显著大于地铁列车年运行次数。

表 5 各特征年限日断面流量及占比

Table 5 Daily cross-sectional flow and proportion of each characteristic year

特征年份	济泺路双向流量/(pcu·d^{-1})	占跨河通道总量比例/%
2020	36 891	29.23
2022	39 280	29.23
2025	43 104	25.32
2030	52 203	23.29
2040	59 548	23.29

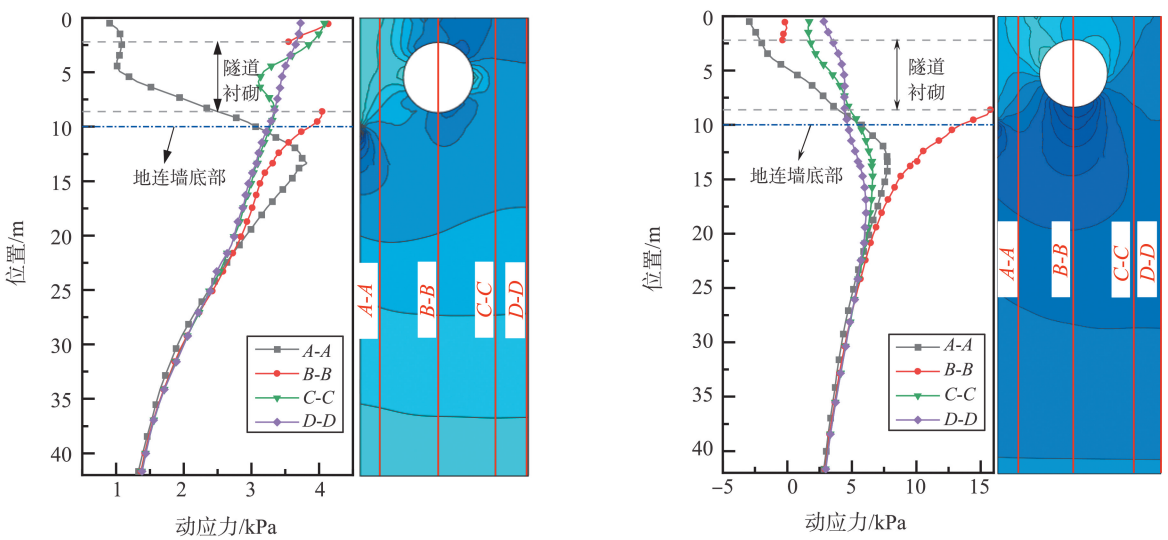
2.4 隧道基底长期沉降计算及对比分析

(1)计算参数

根据数值模型计算结果，提取不同工况下动力响应数据，根据文献[5,10,21]计算得到地层不同位置处动静偏应力 q_d、q_s，并结合累计塑性应变数学模型公式，得到各点的累计轴向塑性应变，采用分层总和法将各单元的累计轴向塑性变形值相加，可求得地层各位置处在列车循环振动荷载作用下的长期沉降值。

(2)动应力响应结果分析

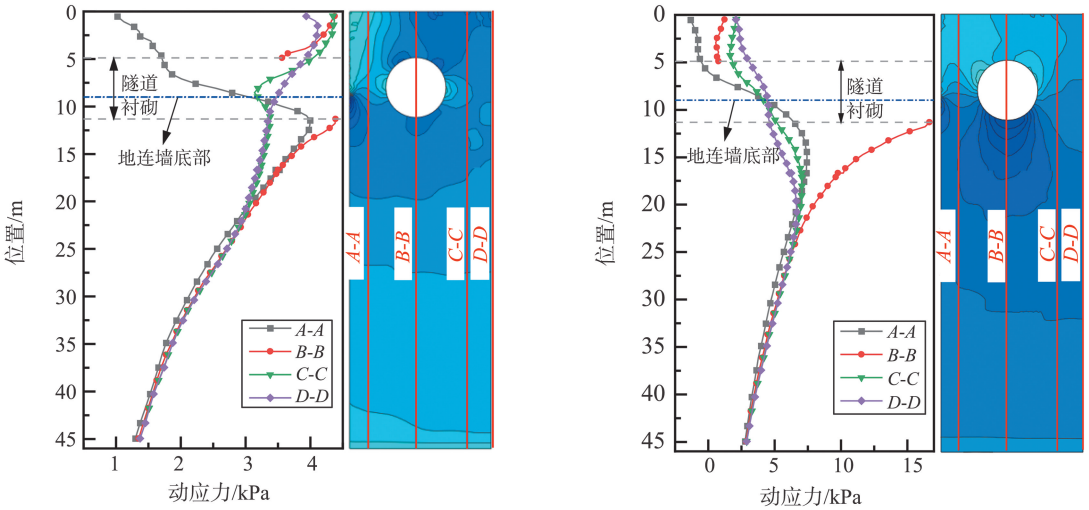
不同工况下地层动应力响应及长期沉降计算结果如图 10~13 所示。



(a) 仅汽车荷载作用　　(b) 汽车、列车荷载共同作用

图 10 净距 2.2 m 地层动应力分布

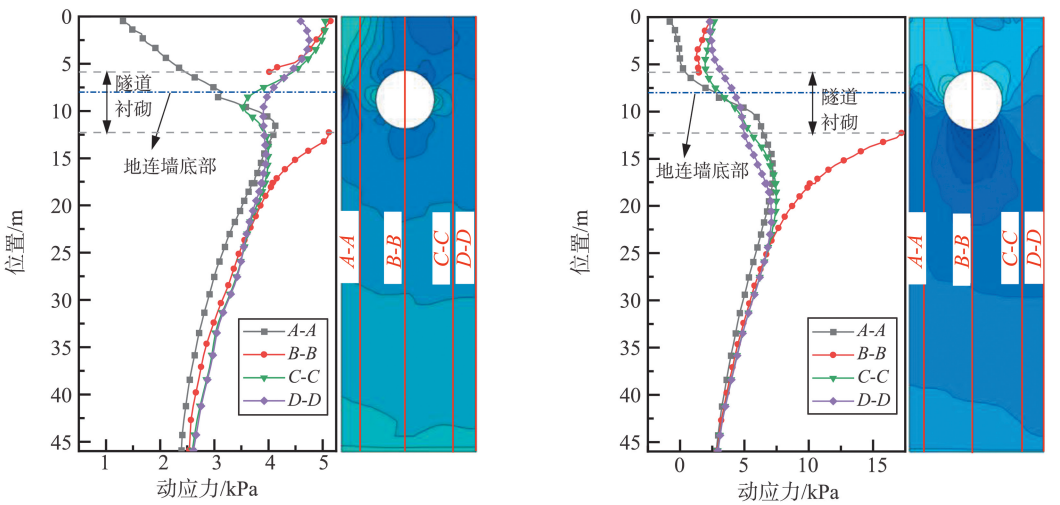
Fig.10 Distribution of dynamic stress in the formation with a net distance of 2.2 m



(a) 仅汽车荷载作用　　(b) 汽车、列车荷载共同作用

图 11　净距 4.9 m 地层动应力分布

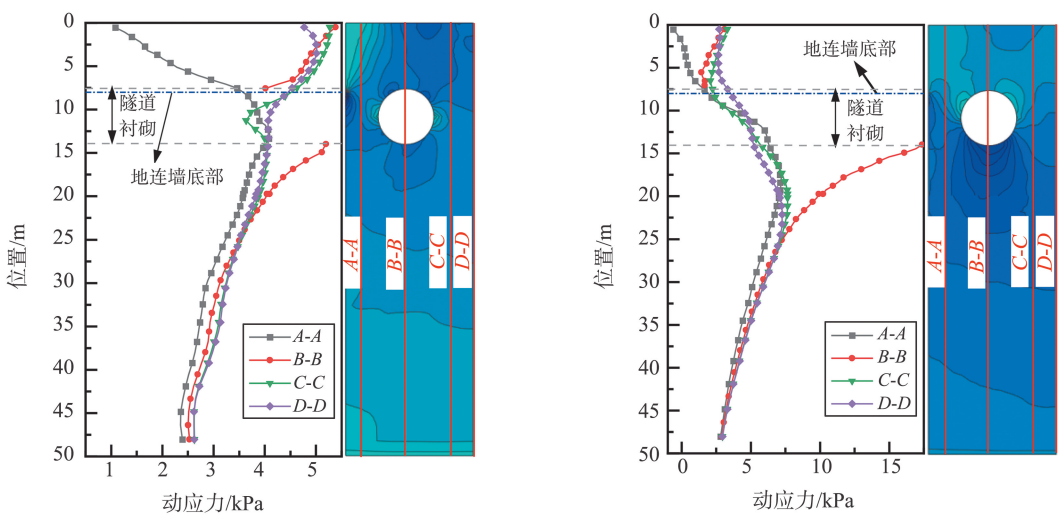
Fig.11　Distribution of dynamic stress in the formation with a net distance of 4.9 m



(a) 仅汽车荷载作用　　(b) 汽车、列车荷载共同作用

图 12　净距 5.875 m 地层动应力分布

Fig.12　Distribution of dynamic stress in the formation with a net distance of 5.875m



(a) 仅汽车荷载作用　　(b) 汽车、列车荷载共同作用

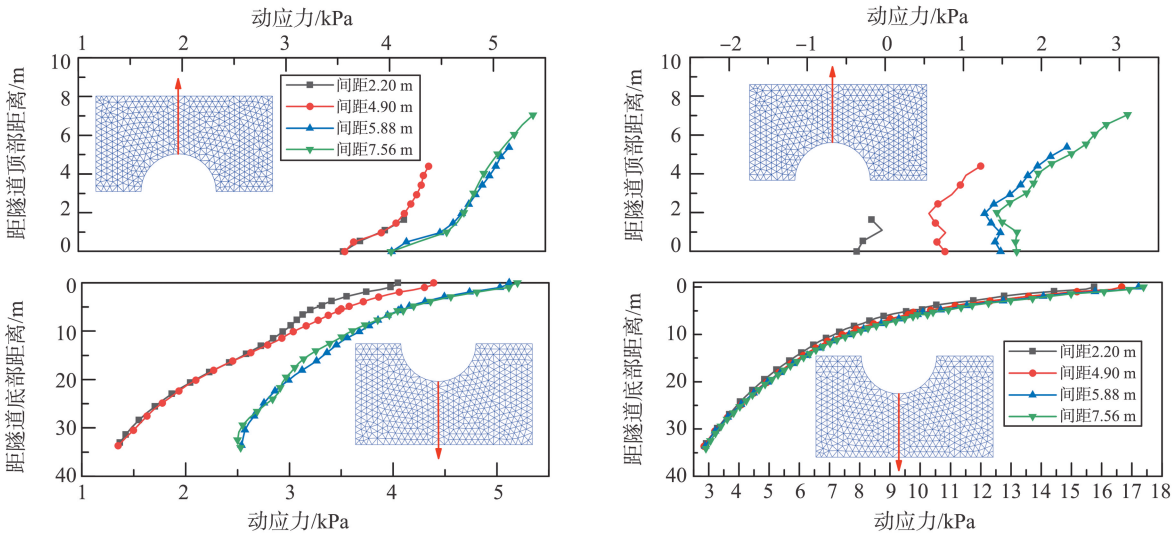
图 13　净距 7.56 m 地层动应力分布

Fig.13　Distribution of dynamic stress in the formation with a net distance of 7.56 m

由图 10~图 13 计算结果对比分析可知:当结构仅受汽车荷载影响时,监测线 *A-A* 受地连墙及既有结构的影响较大,靠近既有公路隧道底部位置的土层应力较小,随深度增加,地层动应力先增大后减小;在监测线 *B-B* 受盾构隧道的影响,隧道底部土层动应力较上部略有增大,均在既有公路隧道底部、盾构隧道底部达到最大值,且在隧道底部 10 m 以内衰减速率较大,达地层动应力变化量的 60%~70%;监测线 *C-C* 与监测线 *D-D* 的变化趋势基本一致,监测线 *C-C* 处地层动应力在盾构隧道处有较大波动。

当隧道受汽车、列车荷载共同作用时,监测线 *A-A*、监测线 *C-C* 及监测线 *D-D* 的土体动应力变化趋势基本相同,由于下部地铁荷载大于上部汽车荷载,以及受地连墙及既有公路隧道的影响,盾构上部监测线 *A-A* 地层动应力部分受拉;监测线 *B-B* 处盾构隧道正下方土体动应力受列车荷载影响较大,应力随深度变化呈对数曲线分布。

为进一步对比不同隧道净距条件下监测线 *B-B* 的土体动应力变化,不同工况下的计算结果如图 14 所示。图 14 每个分图中的上下两个坐标区域分别表示隧道顶部以上和隧道底部以下土体的动应力分布,共同表征同一工况下监测线 *B-B* 的土体动应力响应。分析图 14 可知:当结构仅受汽车动载影响时,地层动应力受既有结构形式影响较大(间距 2.20 m、间距 4.90 m 为双层框架结构,间距 5.88 m、间距 7.56 m 为单层框架结构),且受既有公路隧道与盾构隧道的共同影响,随两隧道间距的增加地层动应力逐渐增加,且同一框架结构的工况隧道附近的动应力基本相同。当结构受汽车、列车荷载共同作用时,当两隧道间距较小时,中间土体受下部列车影响较大,土体动应力增量为负,随隧道间距的增大,中间土体在上部汽车荷载的影响下土体动应力逐渐增大;不同工况下盾构下部土体动应力变化趋势基本相同。



(a) 仅汽车荷载作用　　(b) 汽车、列车荷载共同作用

图 14　不同工况下监测线 *B-B* 土体动应力变化

Fig.14　Dynamic stress changes of soil on monitoring line *B-B* under different working conditions

(3)隧道长期沉降分析

根据地层动静偏应力计算结果,结合累计轴向塑性变形计算公式得到各监测线长期沉降曲线。引入相似工程地铁动载致沉降监测结果[22]进行对比,少数空缺值采用线性插补方式填充。该工程的地铁隧道埋置于极软黏土层中,地层具有高含水量、高压缩性和低渗透性等特征,与本研究饱和软黏土基底在工程性质上较为接近;同时,两者均关注软弱含水土体中隧道长期沉降发展问题。该案例可作为本研究计算结果沉降量级和演化趋势的参考对标。但需要说明的是,二者在隧道类型、荷载条件和外部环境扰动等方面仍存在差异,因此该对比仅用于说明本研究计算结果的合理性,而不作为严格的实测验证。将对比数据插入图 15(c)、图 15(d)中,得到各断面监测线 *B-B* 处既有公路隧道的底部土体的长期沉降与相似工程结果对比如图 15 所示。

由图 15 计算结果分析可知:本研究计算结果与相似软土工程长期沉降的量级及演化趋势基本一致,说明所采用计算方法具有合理性。隧道各位置的长期沉降均发生在运营前期,在第一年隧道底部沉降占 10 年总沉降的 48% 左右,随运营时间的增长,隧道沉降趋势逐渐缓慢;在本工程荷载条件下汽车荷载对既有公路隧道长期沉降的贡献明显大于列车荷载。由于运行阶段通过该截面的汽车日交通量

远大于列车的运行次数,汽车循环荷载作用次数显著多于列车。汽车荷载直接作用于既有公路隧道结构底部,其动应力在浅层土体中的传播更为显著,从而对既有公路隧道底部土体的累积塑性变形产生较大影响;而列车荷载主要作用于下部盾构隧道结构,对既有公路隧道沉降的直接影响相对较小。因此,在汽车与列车荷载共同作用条件下,既有公路隧道沉降主要由汽车荷载控制,而列车荷载主要改变下部土体应力分布并对整体沉降发展产生一定叠加影响。为探究不同位置处既有公路隧道底板沉降规律,提取 10 年后监测线 *B* 处既有公路隧道底部沉降量,如图 16 所示。

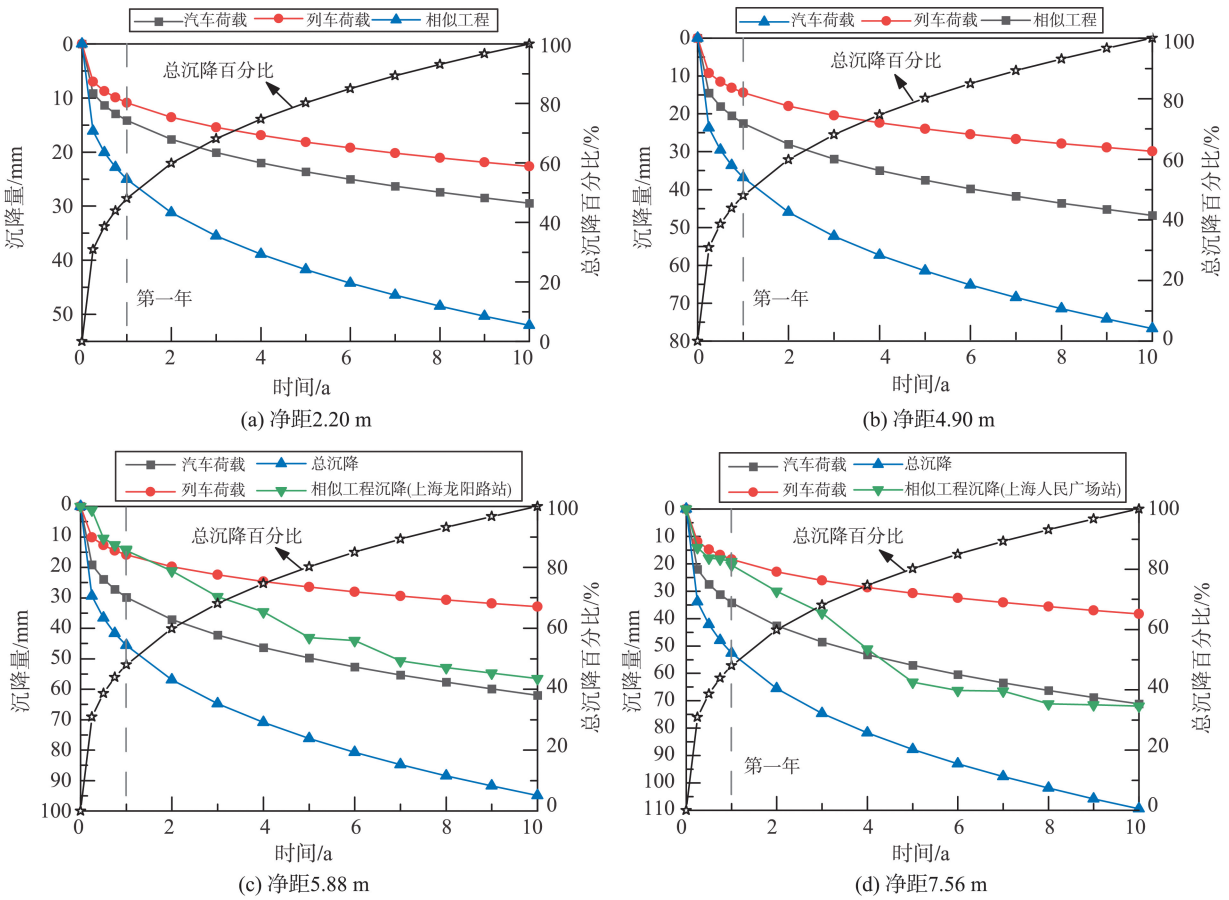


图 15　既有公路隧道底部监测线 *B* 处长期沉降曲线

Fig.15　Long term settlement curve of monitoring line *B* at the bottom of the existing highway tunnel

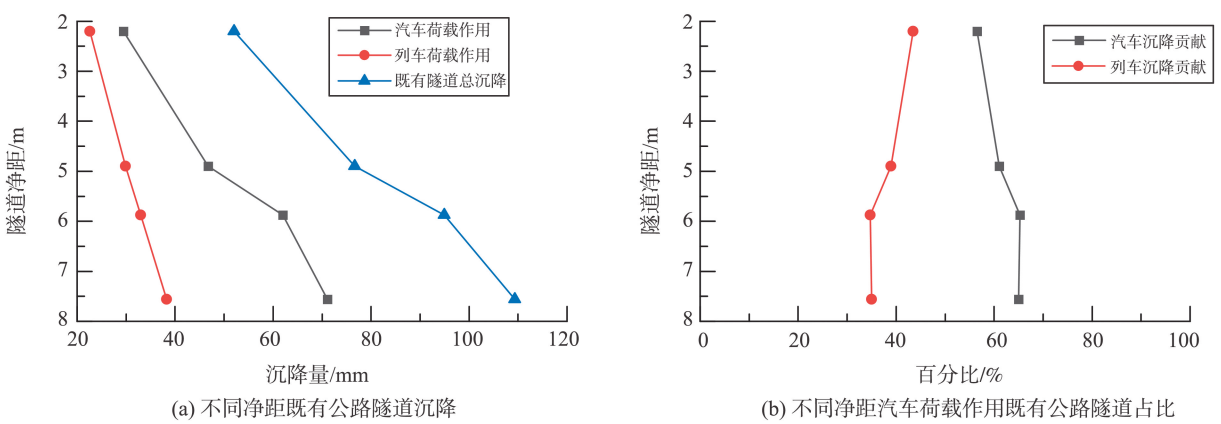


图 16　10 年后不同净距下监测线 *B* 处既有公路隧道底部沉降情况

Fig.16　Monitoring the bottom settlement of the existing highway tunnel at point *B* under different net distances 10 years later

由图 16 可知:随隧道间距的增加,既有公路隧道底部的沉降逐渐增加,且汽车作用产生影响变化较为明显,其占比先增大后减小,当间距为 5.875 m 时,汽车荷载产生的沉降占比最大为 65%,产生的既有公路隧道底部监测线 *B*-*B* 处沉降量为 62 mm。从地层应力传递及土体变形机理角度分析,当两隧

道间距较小时,中间夹层土体受既有公路隧道结构及盾构隧道结构的共同约束作用,土体变形受到限制,应力主要集中在隧道附近局部区域,应力扩散范围较小,因此土体累积塑性变形相对较小。随着两隧道间距的增大,隧道之间的结构约束作用逐渐减弱,地层应力场发生重新分布,在循环荷载作用下动应力逐渐向深部及周围土体扩散,使得盾构隧道下部及既有公路隧道底部土体的应力水平提高,从而导致土体累积塑性变形增加,最终表现为既有公路隧道沉降量随隧道净距的增大而逐渐增大。

提取监测线 *B-B* 处地层不同位置处沉降量,结果如表 6 所示。由表 6 可知:地层的沉降量主要集中于盾构隧道下部土层,且当间距为 2.2 m 时,盾构隧道下部土层沉降占比达 92.4%,随隧道间的净距增加,盾构隧道下部土层的沉降量仍逐渐增大,但其占比逐渐减小。根据土体累积塑性变形公式,从土体压缩性的角度计算十年后既有公路隧道底部土体不同位置处(监测线 $A \sim D$)的长期沉降,如图 17 所示。

表 6 监测线 *B-B* 处地层不同位置处沉降量

Table 6 Settlement at different positions of the formation at monitoring line *B-B*

隧道净距/m	夹层土体沉降量/mm	盾构隧道底部沉降量/mm	既有公路隧道底部沉降量/mm	盾构隧道下部土层沉降占比/%
2.20	3.81	48.24	52.05	92.68
4.90	14.12	62.55	76.67	81.58
5.88	18.72	76.21	94.93	80.28
7.56	23.17	86.20	109.37	78.81

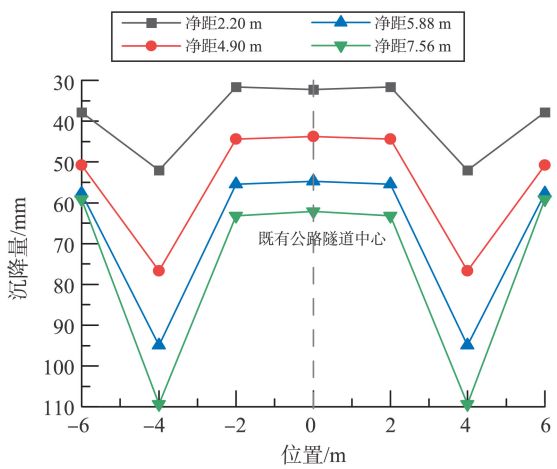


图 17 既有公路隧道底部土体沉降值

Fig.17 Soil bottom settlement value of existing highway tunnels

由图 17 计算结果可知:不同净距下既有公路隧道结构沉降的最大值均发生在隧道车道中心位置(盾构隧道中心线处),且随净距增加,结构沉降量逐渐增大。由于不同位置的长期沉降主要以土体的压缩为计算依据,未考虑结构的影响。在实际工程中,由于结构刚度的影响,结构的不均匀沉降维持在很小的水平,通过计算各监测线既有公路隧道结构底部土体长期沉降的算术平均值来确定该截面处的长期沉降量,如图 18 所示。

基于本研究不同净距工况下的数值计算结果,得到本工程条件下既有公路隧道长期沉降与隧道净距之间的拟合参考关系,如式(7)所示。该关系可反映本研究工程条件下长期沉降随净距变化的基本趋势,并可为类似工程条件下的沉降估算和方案比选提供参考。式(7)线性拟合关系的决定系数为 $R^2=0.98$,说明拟合结果具有较好的相关性。

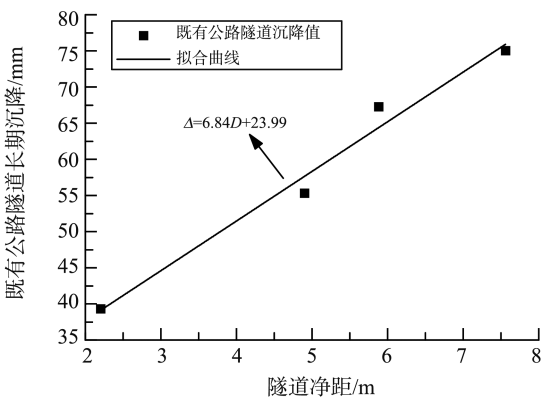


图 18 不同净距结构沉降拟合曲线

Fig.18 Different net distance structure settlement fitting curves

$$\Delta = 6.84D + 23.99, \tag{7}$$

式中:Δ 为既有公路隧道沉降值;D 为隧道净距。

3 讨论

本研究基于车辆循环荷载作用下既有公路隧道长期沉降问题,结合工程地质条件、结构形式及交通荷载预测结果建立分析模型。由于模型参数主要来源于本研究工程勘察资料及设定计算工况,其适用范围应限定在与本研究工程相近的地层条件和隧道空间关系内,即地层分布较连续、层状特征较明确,以粉质黏土为主,且隧道埋深、结构尺寸及净距条件与本研究工程相近的情况。当工程处于软硬突变地层、断层破碎带、强富水地层,或隧道净距明显减小、相邻隧道相互作用增强时,围岩应力重分布和长期变形特征可能发生变化,需结合具体工况对模型参

数进行修正。本研究运营期动力计算中土体参数采用原状土试验参数,尚未进一步区分盾构施工扰动后邻近土体动力特性的变化。该处理有利于在统一参数条件下对比分析不同净距及荷载组合对隧道长期沉降的影响规律。实际工程中,盾构掘进可能使邻近夹层土体产生一定扰动,尤其在最小净距 2.2 m 工况下,该影响相对更为敏感,可能导致局部土体刚度及动力响应与原状土存在差异。因此,本研究计算结果更侧重于反映不同工况下长期沉降的发展趋势及相对差异;对于小净距条件下的沉降绝对值,可在后续研究中结合施工扰动范围、现场监测数据或扰动后土体动力参数进行进一步修正。

此外,本研究车辆循环荷载根据单边静轮重 20 kN、簧下质量120 kg、路面不平整度 2 mm、车速 60 km/h及交通量预测结果确定,主要适用于常规公路交通荷载作用下的运营期沉降分析。若实际运营过程中存在超载车辆比例较高、重载交通集中、车速波动较大或路面平整度劣化等情况,车辆动荷载幅值和循环次数将发生变化,需重新确定荷载输入。受计算条件限制,本研究对地层参数、交通增长规律和车辆荷载形式进行了适当简化,尚未充分考虑地层空间变异性、车辆荷载随机性、地下水变化、结构劣化及盾构施工扰动分区等因素的影响。后续研究可结合现场监测数据、施工扰动分区及参数修正方法进一步完善模型,以提高长期沉降分析结果的适用性。

4　结论

本研究依托济南轨道交通 M2 线穿黄隧道工程,通过室内试验与数值模拟分析了列车循环动载作用下新建盾构隧道并行下穿既有公路隧道的长期沉降发展规律。

(1)针对济南穿黄区段饱和软黏土在静－动耦合荷载下的塑性变形特性,通过室内动三轴试验拟合,建立了综合考虑土体静强度、初始静偏应力与循环动偏应力的累计塑性应变数学模型,更贴合冲积平原软土在交通往复荷载下的力学响应特征。

(2)在汽车与列车荷载共同作用下,两隧道净距较小时,中间土体受下部列车动载扰动显著,动应力增量表现为负值;随隧道净距增大,上部汽车荷载的影响逐渐占优,土体动应力逐步上升。不同工况下盾构隧道下方土体动应力变化规律基本一致。

(3)隧道长期沉降主要集中在运营前期,运营第 1 年底部沉降约占 10 年总沉降的 48%,后期沉降速率逐渐趋缓。其中汽车荷载引发的长期沉降占比高于列车荷载。随隧道净距增加,既有公路隧道底部沉降整体增大,汽车荷载贡献占比呈先增大后减小趋势,在净距 5.875 m 时占比最大,达到 65%。

(4)本研究在现有沉降模型基础上,进一步考虑隧道净距变量与长期时间效应,结合不同净距工况下的数值计算结果,建立了循环荷载作用下盾构隧道变间距并行下穿既有公路隧道的长期沉降拟合参考关系。该关系可反映本研究工程条件下隧道净距、列车循环动载、汽车静动载及时间效应对既有公路隧道长期沉降的共同影响,为类似近接隧道工程的沉降趋势分析和方案比选提供参考。

(5)依托济南穿黄隧道工程的计算与拟合结果表明,隧道净距直接控制既有结构沉降量级与荷载分担比。在并行隧道设计与施工中,应以既有隧道长期沉降控制为核心目标,综合考量地层条件、交通荷载叠加效应及结构安全要求,合理确定隧道净距。通过优化隧道间距,可有效调控既有隧道沉降量级与沉降速率,避免沉降超标对既有隧道结构安全及运营稳定性造成影响。本研究成果与拟合公式可为相似隧道工程的沉降控制与间距优化设计提供参考。

参考文献:

[1] Jiang Yujing, Pan Zhutian, Zhang Xuepeng. Tunnel infrastructure health management: a state-of-the-art review on defect development mechanism and robot-aided inspection system [J]. Smart Underground Engineering, 2025, 1(1): 26-39.

[2] Chen Weizhong, Tan Xuyan, Yang Jianping. Review of state-of-the-art in structural health monitoring of tunnel engineering[J]. Smart Underground Engineering, 2025, 1(1): 40-50.

[3] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading [J]. Transportation Research Record, 1975, 537: 1-17.

[4] Li D Q, Selig E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006-1013.

[5] Chai J C, Miura N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907-916.

[6] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891-895.
Huang Maosong, Li Jinjun, Li Xingzhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

2006, 28(7): 891-895.

[7] 魏星, 黄茂松. 交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3342-3346.
Wei Xing, Huang Maosong. A simple method to predict traffic-load-induced permanent settlement of road on soft subsoil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3342-3346.

[8] 高广运, 李绍毅, 涂美吉, 等. 地铁循环荷载作用下交叉隧道沉降分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 486-490.
Gao Guangyun, Li Shaoyi, Tu Meiji, et al. Analysis of settlement of cross tunnels under cyclic metro loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 486-490.

[9] 彭红霞, 王怀东, 袁云辉, 等. 列车循环动荷载下地铁四孔交叠隧道长期沉降及控制分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 31-35.
Peng Hongxia, Wang Huaidong, Yuan Yunhui, et al. Long-term settlement and control analysis of four-hole overlapping metro tunnel under train cyclic load[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 31-35.

[10] 刘维正, 石志国, 章定文, 等. 交通荷载作用下结构性软土地基长期沉降计算[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 726-735.
Liu Weizheng, Shi Zhiguo, Zhang Dingwen, et al. Long-term settlement calculation of structured soft clay foundation under traffic loading[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(4): 726-735.

[11] 王加辉, 丁嘉浩, 程姿洋, 等. 三线近距并行盾构隧道掘进数值模拟及变形分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2025, 41(5): 644-655.
Wang Jiahui, Ding Jiahao, Cheng Ziyang, et al. Numerical simulation and deformation analysis of three-line closely spaced parallel shield tunneling[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2025, 41(5): 644-655.

[12] 杨兵明, 刘保国. 地铁列车循环荷载下软土地区盾构隧道长期沉降分析[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 61-67.
Yang Bingming, Liu Baoguo. Analysis of long-term settlement of shield tunnel in soft soil area under cyclic loading of subway train[J]. China Railway Science, 2016, 37(3): 61-67.

[13] 刘汝辉. 软土小净距并行盾构隧道后行掘进对先行隧道的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 61-68.
Liu Ruhui. Effect of subsequent tunnel driving on preceding tunnel of parallel shield tunnels with small clear distance in soft soil[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2024, 45(3): 61-68.

[14] Zhou X L, Gong Q M, Tian Z Y, et al. Dynamic response and long-term settlement of four overlapping tunnels subject to train load[C]//Advances in Transportation Geotechnics IV. Cham, Germany: Springer International Publishing, 2022: 33-48.

[15] TB 10102—2010 铁路工程土工试验规程[S].

[16] 石钰锋, 曹成威, 谈亦帆, 等. 地铁隧道基底饱水风化软岩动力响应及长期沉降研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 86-95.
Shi Yufeng, Cao Chengwei, Tan Yifan, et al. Study on dynamic response and long-term settlement of water-saturated Weathered soft rocks at the base of subway tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 86-95.

[17] 肖军华, 刘建. 循环荷载下粉土路基土的变形性状研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 1-8.
Xiao Junhua, Liu Jian. Research on the deformation behaviors of silt subgrade soil under cyclic loading[J]. China Railway Science, 2010, 31(1): 1-8.

[18] 王涛. 跨地裂缝带高铁路基动力稳定性及长期沉降研究[D]. 西安:长安大学, 2020:48-54.
Wang Tao. Research on the dynamic stability and settlement of high-speed railway long-term subgrade crossing ground fissure zone[D]. Xi′an: Chang′an University, 2020: 48-54.

[19] 宫全美, 罗喆, 袁建议. 提速铁路基床长期累积沉降及等效循环荷载试验研究[J]. 铁道学报, 2009, 31(2): 88-93.
Gong Quanmei, Luo Zhe, Yuan Jianyi. Experimental study on long-term cumulative settlement and equivalent cyclic load of speed-up railway subgrade soil[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(2): 88-93.

[20] 张艳美, 梁波. 几何不平顺条件下高速公路路基的动态响应[J]. 兰州铁道学院学报, 2001, 20(4): 66-69.
Zhang Yanmei, Liang Bo. Dynamic response to subgrade of highway in geometric irregularity condition[J]. Journal of Lanzhou, 2001, 20(4): 66-69.

[21] 徐林荣, 陈昀灏, 商拥辉, 等. 基于力学-经验模型的交通荷载作用下软基长期沉降计算[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(5): 1-10.
Xu Linrong, Chen Yunhao, Shang Yonghui, et al. Long-term settlement calculation of soft soil foundation under traffic load based on mechanical-empirical model[J]. Journal of Chang′an University (Natural Science Edition), 2021, 41(5): 1-10.

[22] Shen S L, Wu H N, Cui Y J, et al. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 309-323.

(编辑:张延欢)