

## 车辆荷载下预制排管缆线管廊接头受力影响分析

王鑫<sup>1</sup>, 付伟庆<sup>1,2,\*</sup>, 刘胜敏<sup>3</sup>, 黄剑<sup>4</sup>, 王建<sup>4</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 山东省高校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 青岛 266525;

3. 广信正合咨询集团有限公司, 青岛 266000; 4. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 预制排管缆线管廊为工厂预制, 现场装配连接, 其上部车辆荷载对接头受力性能影响较大。为探究车辆荷载对管廊接头受力性能的影响, 以截面尺寸为 1190 mm×750 mm 的预制排管缆线管廊为例, 采用有限元分析方法, 对不同预应力和土体刚度在车辆荷载影响下的接头受力性能进行了研究。研究结果表明: 车辆荷载纵向作用于管廊接头时, 提升底部土体刚度可以有效限制结构纵向变形; 车辆荷载横向作用于管廊接头时, 提升预应力和侧面土体刚度可以有效限制结构横向变形。

**关键词:** 预制排管缆线管廊; 管廊接头; 车辆荷载; 受力性能

**中图分类号:** TU990.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)02-0058-08

## Analysis of the force effect of prefabricated cable tunnel corridor joints under vehicle load

WANG Xin<sup>1</sup>, FU Weiqing<sup>1,2,\*</sup>, LIU Shengmin<sup>3</sup>, HUANG Jian<sup>4</sup>, WANG Jian<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone,

Qingdao 266525, China; 3. Guangxin Zhenghe Consulting Group Co. Ltd., Qingdao 266000;

4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Prefabricated cable tunnel (PCT) is prefabricated for factory and assembled onsite, whose upper vehicle load has a greater impact on the force performance of joints. In order to investigate the effect of the vehicle load on the performance of PCT corridor joints, this study takes a PCT with cross-sectional size of 1190 mm×750 mm as an example, uses the method of finite element analysis and investigates the force performance of joints under the influence of vehicle load for different prestress values and soil stiffness. The research results show that when the vehicle load acts longitudinally on the PCT corridor joints, enhancing the bottom soil stiffness can effectively limit the longitudinal deformation of the structure; when the vehicle load acts transversely on the PCT corridor joints, enhancing the prestressing and lateral soil stiffness can effectively limit the transverse deformation of the structure.

**Key words:** prefabricated cable tunnel; corridor joints; vehicle load; force performance

收稿日期: 2022-04-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0805000); 国家自然科学基金资助项目 (52178488); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2019MEE020); 上海市青年科技启明星计划 (20QB1404900)

作者简介: 王鑫 (1996-), 男, 山东济南人。硕士, 研究方向为地下基础设施结构。E-mail: 2542918451@qq.com。

\* 通信作者: 付伟庆 (1976-), 男, 黑龙江哈尔滨人。博士, 教授, 主要从事工程结构防灾方面的研究。E-mail: fuweiqing@qut.edu.cn。

预制排管缆线管廊<sup>[1-3]</sup>是城市综合管廊“神经末梢”,如图 1 所示,集电力、电信等工程管线于一体,一般埋置于支路下方,具有断面小、埋深浅等特点。由于山地、老城区等城市支路、居民小区道路地下空间有限,无法铺设大型综合管廊,造成大范围的城市架空线,极大地影响了城市形象<sup>[4-5]</sup>,预制排管缆线管廊广泛应用于上述施工和交通不便区域<sup>[6]</sup>。预制排管缆线管廊浅埋于道路下方,当渣土车经过管廊时,会对结构接头产生正向和侧向力的作用,如果荷载过大则会引起结构变形过大,进而影响结构的受力性能及抗渗能力。

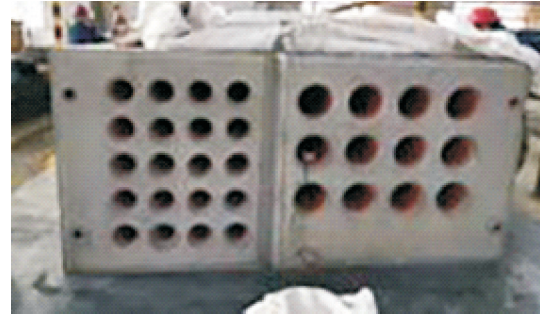


图 1 预制排管缆线管廊

徐健等<sup>[7-8]</sup>通过有限元模拟研究了行车速度等因素对管廊顶板变形的影响并与实测数据进行了对比验证,同时基于吉首市综合管廊工程,通过现场荷载试验验证了有限元模型的正确性,探究了不同荷载幅值、车辆荷载作用位置对管廊接头和纵向受力性能的影响;全勇<sup>[9]</sup>通过车辆荷载简化模型,分析了车辆荷载对管廊结构的内力、变形以及地表沉降的影响;李磊<sup>[10]</sup>采用有限元分析研究了静荷载和动荷载作用下,车速、埋深等因素对管廊受力性能的影响。

由于预制排管缆线管廊接头变形会影响内部管线的正常使用,本文着重对简化车辆静荷载作用于预制管廊接头区域后接头张开量进行了研究,建立了浅埋预制排管缆线管廊在车辆荷载下的有限元模型,对车辆荷载正向和侧向作用于结构产生的作用力进行了计算,研究并分析了车辆荷载对管廊接头产生正向和侧向力的作用下,预应力、土体刚度设计参数对预制管廊接头受力及变形影响。研究成果可对预制排管缆线管廊设计和工程应用提供参考。

## 1 车辆荷载下管廊受力与有限元建模

### 1.1 车辆荷载类型与管廊受力

常用渣土车自重  $D=15\text{ t}$ ,最大载重  $L=15\text{ t}$ ,经实测每只轮胎与地面的接触面积  $S=0.02\text{ m}^2$ ,共 10 个轮胎与地面接触。采用粉细砂回填,回填土厚度  $h=2\text{ m}$ ,粉细砂内摩擦角  $\varphi=30^\circ$ ,回填土容重  $\gamma=18\text{ kN/m}^3$ ,不考虑地下水浮力作用。根据《城市综合管廊工程技术规范》(GB 50838—2015)<sup>[11]</sup>,接头最大张开量不超过 3 mm,错位量不应大于 10 mm。

当渣土车作用于管廊正上方时,仅对管廊结构竖向土压力产生影响,将车辆荷载等效为作用于沿接头纵向两侧各 500 mm 的静力荷载,如图 2 所示。管廊所受压力示意如 3 图所示。

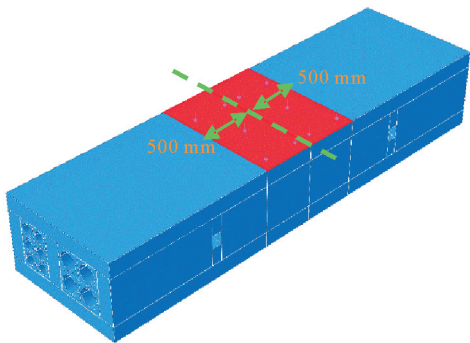


图 2 正向荷载作用位置

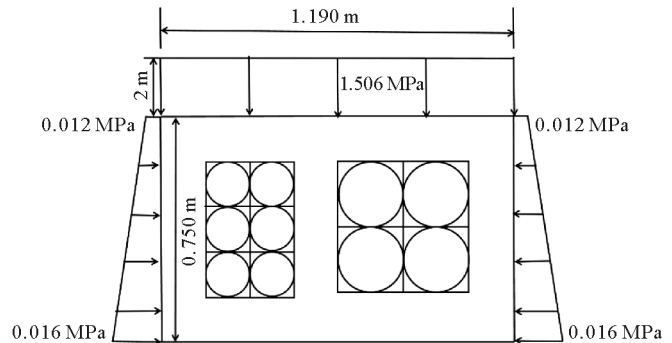


图 3 荷载作用在正上方管廊所受压力示意

管廊受竖向土压力  $P_{竖1}$  为

$$P_{竖1} = P_{\pm} = \gamma \times h = 0.036\text{ MPa} \tag{1}$$

管廊受竖向渣土车压力  $P_{竖2}$  为

$$P_{\text{竖}2} = (D+L) \times g/S = 1.470 \text{ MPa} \quad (2)$$

因此,管廊所受压力  $P_{\text{竖}0}$  为:

$$P_{\text{竖}0} = P_{\text{竖}1} + P_{\text{竖}2} = 1.506 \text{ MPa} \quad (3)$$

根据库伦土压力计算公式:

$$P_{ai} = \gamma h_i K_a \quad (4)$$

式中:  $P_{ai}$  为库伦土压力;  $\gamma$  为回填土的容重;  $h_i$  为回填土深度;  $K_a$  为土压力系数,取 0.33。

根据式(4),结构两侧的顶部水平压力  $P_{11}$  和底部水平土压力  $P_{12}$  分别为

$$\begin{cases} P_{11} = \gamma h_1 K_a = 1.188 \times 10^{-2} \text{ MPa} \\ P_{12} = \gamma h_2 K_a = 1.634 \times 10^{-2} \text{ MPa} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $h_1$  为结构顶部埋深,取  $h_1 = 2 \text{ m}$ ;  $h_2$  为结构底部埋深,取  $h_2 = (2+0.750) \text{ m}$ 。

当渣土车作用于管廊侧面时,仅对管廊结构水平土压力产生影响,将车辆荷载等效为作用于沿接头横向向外侧各 500 mm 处的静力荷载,如图 4 所示。图 5 为荷载作用在侧方管廊所受压力示意。

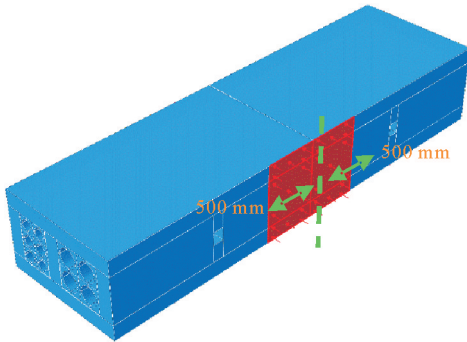


图 4 侧向荷载作用位置

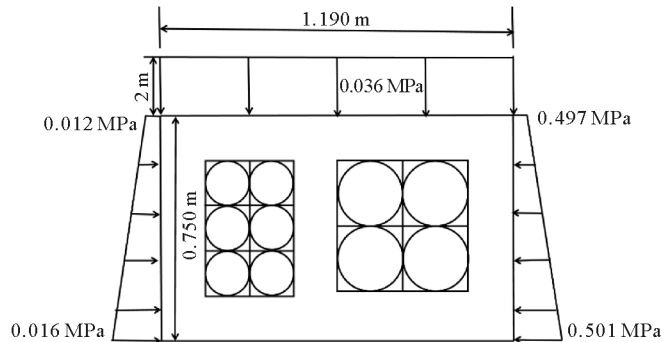


图 5 荷载作用在侧方管廊所受压力示意

管廊埋深  $h = 2 \text{ m}$ ,此时管廊受竖向土压力  $P_{\text{侧}1} = P_{\text{竖}1} = 0.036 \text{ MPa}$ ,传递系数为 0.33,根据式(5),结构两侧顶部水平土压力为  $P_{21} = 1.188 \times 10^{-2} \text{ MPa}$ ,底部水平土压力为  $P_{22} = 1.634 \times 10^{-2} \text{ MPa}$ 。渣土车对管廊造成的水平压力  $P_{23} = 0.33 \times P_{\text{竖}2} = 0.485 \text{ MPa}$ ,因此,渣土车荷载传至回填土的压力  $P_{23} = 0.485 \text{ MPa}$ ,渣土车荷载传至管廊顶部和底部的水平压力见式(6)。

$$\begin{cases} P_{\text{顶}} = P_{21} + P_{23} = 0.497 \text{ MPa} \\ P_{\text{底}} = P_{22} + P_{23} = 0.501 \text{ MPa} \end{cases} \quad (6)$$

## 1.2 车辆荷载作用下管廊建模

预制排管缆线管廊截面尺寸与配筋如图 6 所示,混凝土采用 C40,钢筋采用 HRB400,纵筋直径为 12 mm,箍筋直径 10 mm,钢筋材料参数如表 1 所示,左右两侧各设 6 个和 4 个外径分别为 110 mm 和 180 mm 的聚氯乙烯(PVC)管套,用于隔离和支撑缆线。

管廊单节长度 2.1 m,节段间通过预应力钢绞线张拉连接,钢绞线材料参数如表 2 所示,形式为两点张拉连接,长度为 2 m,张拉控制应力设计为 117 MPa,采用降温法施加预应力<sup>[12]</sup>。

采用 MPC(Model-based Predictive Control)模拟节段间预应力的张拉连接作用<sup>[13-14]</sup>。两节段间的接触面采用面与面摩擦的形式,切向和法向行为分别用“罚”和“硬”接触定义,摩擦系数为 0.8,其余

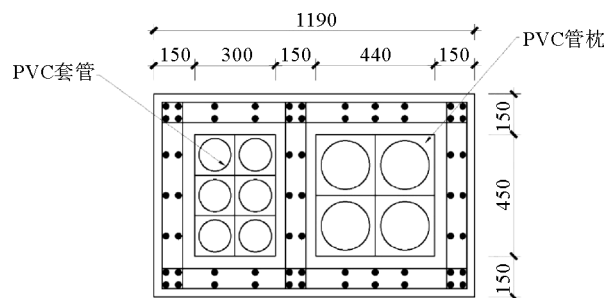


图 6 排管管廊截面设计(单位:mm)

表 1 钢筋材料参数

密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
7850	200	0.3	400



部分设为 0.3。用嵌入方式将钢筋骨架和混凝土进行约束,不考虑黏结滑移。

表 2 钢绞线材料参数

钢绞线结构	公称直径/mm	公称横截面积/mm <sup>2</sup>	公称抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	整根钢绞线最大拉力/kN
1×7	15.2	140	1860	1395	260

为保证模拟的准确性、真实性,在结构底部、两端及水平土压力较小的一侧采用接地弹簧模拟土体对结构的支撑作用。弹簧刚度系数根据土体的基床系数按照式(7)进行取值。

$$k = K L d \tag{7}$$

式中: $k$  为土体弹簧刚度系数; $K$  为土体基床系数,查规范<sup>[15]</sup>得  $K = 2.0 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ ;  $L$  和  $d$  分别为构件(单元)的长度与宽度,本文结构单元的长与宽均为 40 mm。

## 2 车辆荷载正向作用底部土体刚度对管廊接头受力影响分析

为探究结构在竖向车辆荷载作用下设计参数对管廊接头受力性能的影响,接头变形是否符合规范,根据上述参数建立有限元模型并进行静力分析,监测路径如图 7 所示。

竖向车辆荷载作用下,竖向张开量为 55.160 mm,张开量不符合规范,可通过提升结构底部土体刚度减小竖向张开量,在有限元模型中调整底面接地弹簧刚度来模拟结构底部土体刚度的改变,分别提高至 160、320、864 N/mm,然后进行有限元模拟分析对比。

在竖向车辆荷载影响下,不同底部土体刚度的混凝土结构的竖向张开量云图如图 8 所示,接头沿监测路径(图 7)的竖向张开量(放大系数 5 倍)如图 9 所示,接头的位移情况如表 3 所示。

从图 8、图 9 和表 3 可以看出,结构随着底部土体刚度的增加,在竖向车辆荷载作用下接头处的竖向位移和竖向张开量明显减小,底部土体刚度的增加限制了结构竖向变形能力,当底部土体刚度增加至 864 N/mm 时,受拉一侧最大张开量为 2.92 mm,符合规范要求。在实际工程中,对结构底部土体进行夯实或者采用混凝土浇筑等,都可以进一步提高结构底部土体的刚度,从而限制结构的变形。

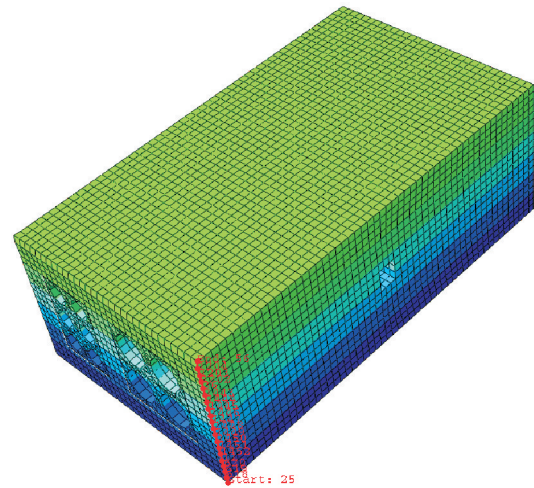
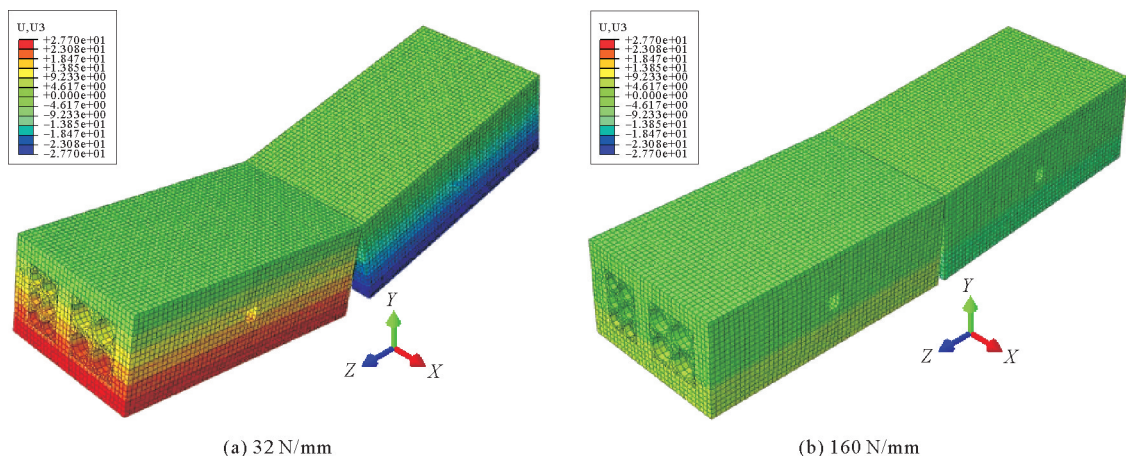


图 7 竖向张开量监测路径



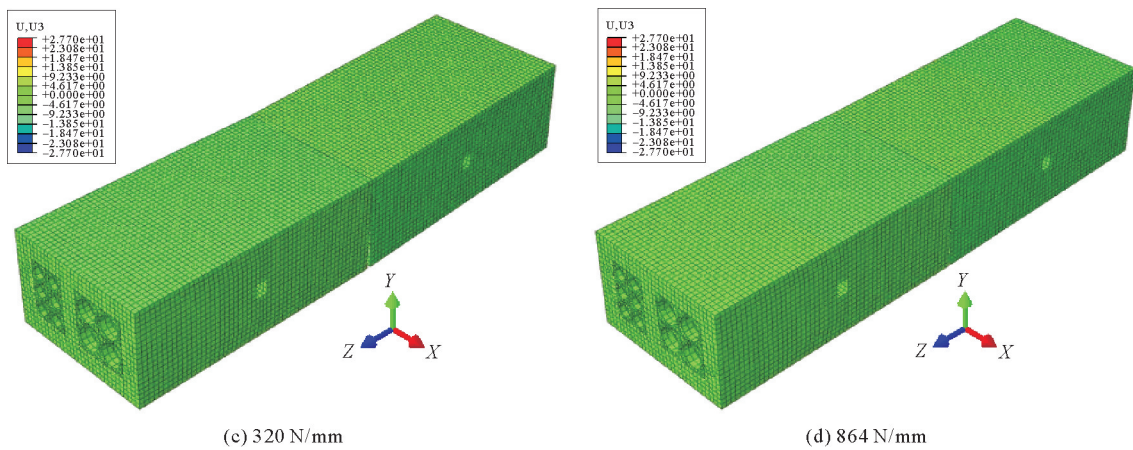


图8 不同底部土体刚度下混凝土结构的竖向张开量云图

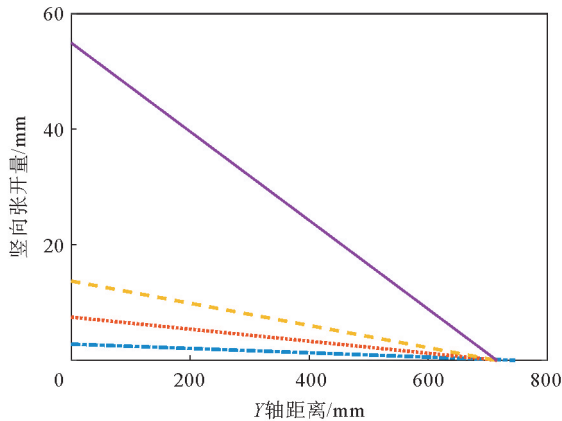


图9 不同底部土体刚度下接头沿监测路径竖向张开量

— 32 N/mm; - - - 160 N/mm; ····· 320 N/mm; - - - 864 N/mm

表3 不同底部土体刚度下接头位移

设计参数	接头位移变化	
	竖向位移/ mm	竖向张开量/ mm
底部土体刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )		
32	67.29	55.16
160	15.46	13.94
320	8.01	7.44
864	3.04	2.92

### 3 车辆荷载侧向作用设计参数对管廊接头受力影响分析

#### 3.1 张拉控制应力对接头受力影响分析

为探究结构在侧向车辆荷载作用下设计参数对管廊接头受力性能的影响,接头变形是否符合规范,根据上述参数建立有限元模型并进行静力分析,监测路径如图10所示。

在侧向车辆荷载作用下,侧向张开量较大,因此可以通过提升钢绞线张拉控制应力进行优化,对有限元模型中钢绞线预应力做出调整,张拉控制应力分别提高至175.5、234、934 MPa,然后进行有限元模拟分析对比。

在侧向车辆荷载影响下,不同预应力下混凝土结构的侧向张开量云图如图11所示,接头沿监测路径(图10)的侧向张开量(变形放大系数20倍)如图12所示,接头的位移情况如表4所示。

从图11、图12和表4可以看出,结构随着钢绞线预应力的增加,在侧向车辆荷载作用下接头处的水平位移和侧向张开量逐渐减小,当预应力增加至934 MPa时,受拉一侧最大张开量为2.04 mm,符合规范

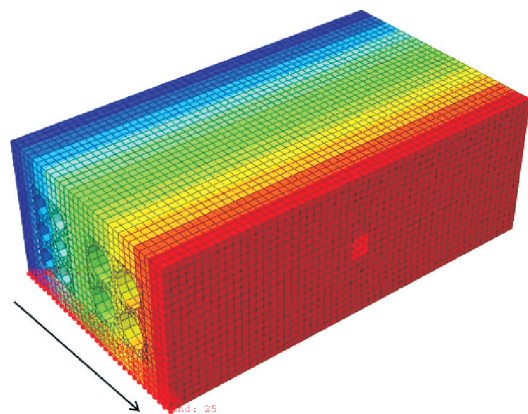


图10 侧向张开量监测路径



要求。实现较大钢绞线预应力张拉,对张拉仪器的要求较高,手孔处的压应力较大,需要在手孔受压处添加钢板分散应力或者采用高强混凝土。

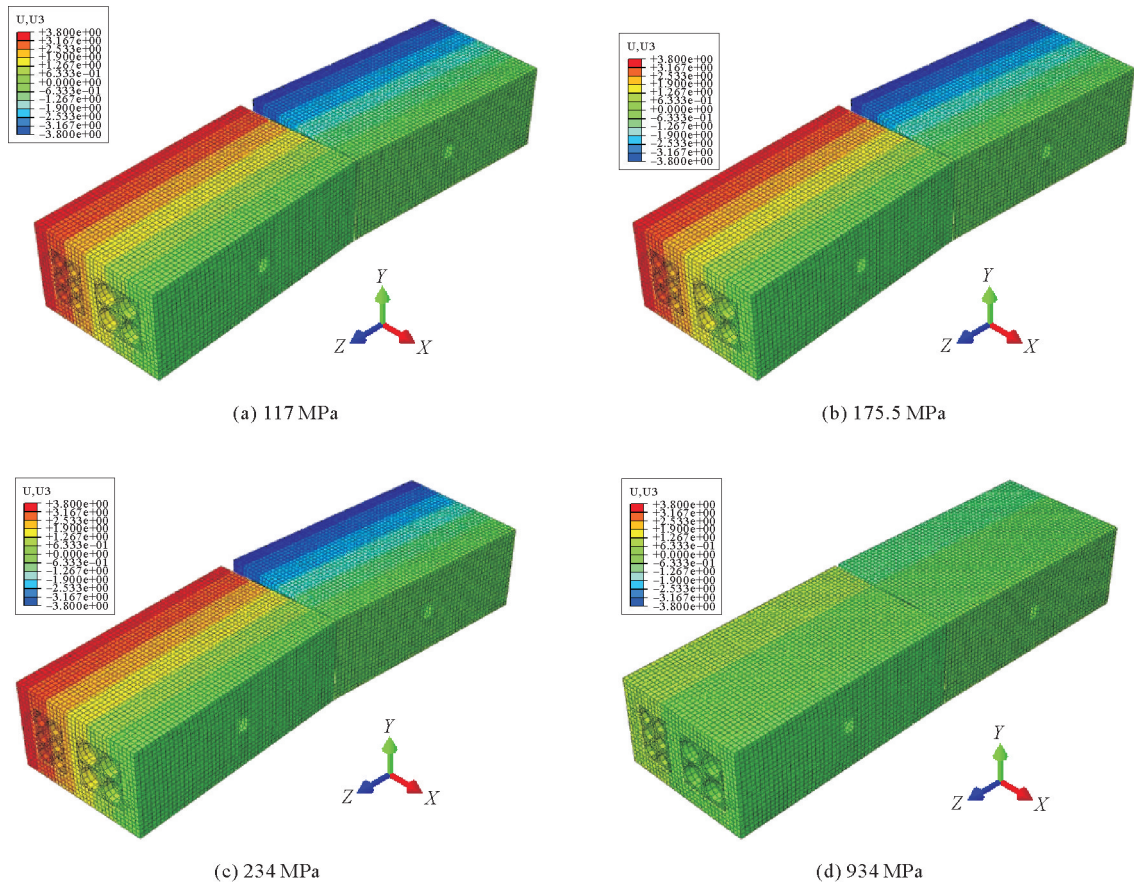


图 11 不同预应力下混凝土结构的侧向张开量云图

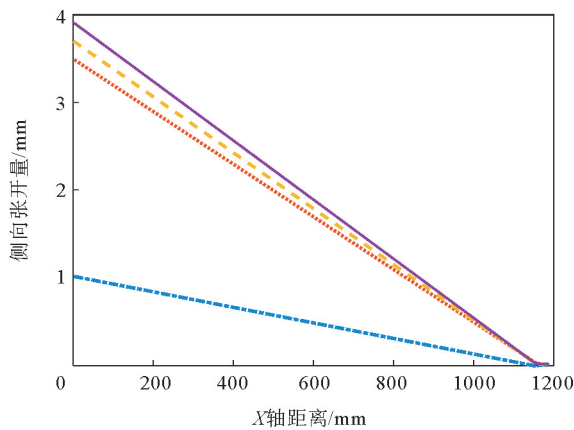


图 12 不同预应力下接头沿监测路径侧向张开量

— 117 MPa; - - 175.5 MPa; ··· 234 MPa; - · - 934 MPa

表 4 不同张拉控制应力下接头位移

设计参数	接头位移变化	
	水平位移/ mm	侧向张开量/ mm
张拉控制应力/ MPa		
117	12.13	3.92
175.5	11.94	3.71
234	11.76	3.50
934	9.62	2.04

### 3.2 侧面土体刚度对接头受力影响分析

在侧向车辆荷载作用下,侧向张开量较大,除提升钢绞线预应力外还可以改变结构侧面土体刚度以减小结构侧向张开量,实际工程中可采用夯实或者选用刚度较大的回填土。对有限元模型中侧面接地弹簧的刚度做出调整来模拟侧面土体刚度的改变,分别提高至 160、320 N/mm,然后进行有限元模拟分析对比。

在侧向车辆荷载影响下,不同侧面土体刚度下混凝土结构的侧向张开量云图如图 13 所示,接头沿监测路径(图 10)的侧向张开量(变形放大系数 20 倍)如图 14 所示,接头的位移情况如表 5 所示。

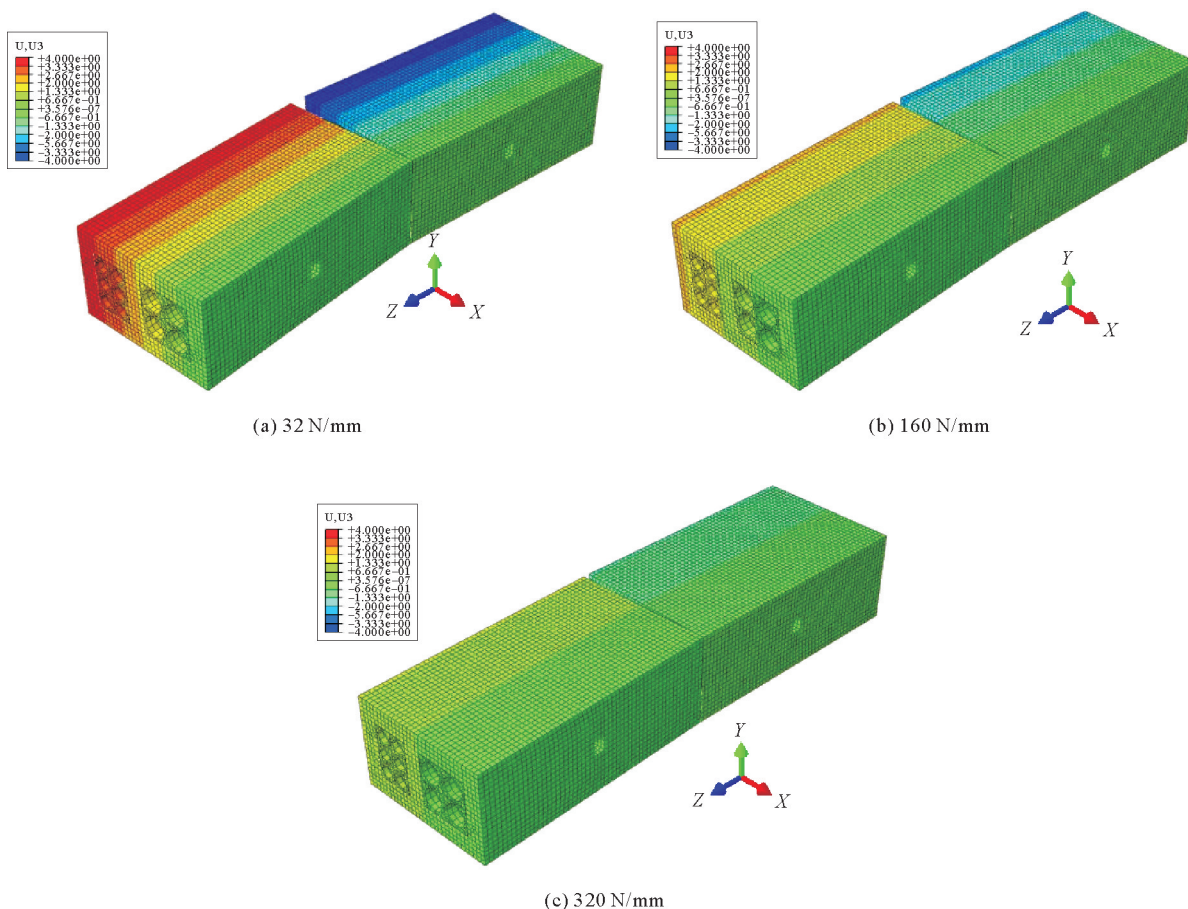


图 13 不同侧面土体刚度下混凝土结构的侧向张开量云图

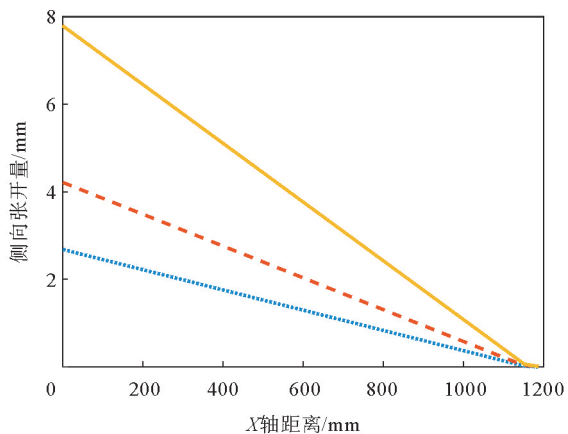


图 14 不同侧面土体刚度接头沿监测路径侧向张开量  
 — 32 N/mm; - - - 160 N/mm; ..... 320 N/mm

表 5 不同侧面土体刚度接头位移

设计参数	接头位移变化	
	水平位移/ mm	侧向张开量/ mm
侧面土体刚度/ ( $N \cdot mm^{-1}$ )		
32	3.71	7.83
160	3.50	4.23
320	1.02	2.70

从图 13、图 14 和表 5 可以看出,结构随着侧面土体刚度的增加,在侧向车辆荷载作用下接头处的侧向张开量明显减小,侧面土体刚度的增加限制了结构侧向的变形能力,当侧面土体刚度增加至 320 N/mm 时,受拉一侧最大张开量为 2.70 mm,符合规范要求。在实际工程中,对回填土进行夯实或者采用碎石土类、爆破石渣、废弃混凝土碎块等,都会进一步提高侧面土体的刚度。

### 4 结论

1) 在竖向车辆荷载作用下,钢绞线预应力限制结构变形的影响不大,底部土体刚度为 864 N/mm 时

可有效抵抗竖向车辆荷载引起的变形,可通过对结构底部土体进行夯实或者采用混凝土浇筑等方式实现。

2) 在侧向车辆荷载作用下,钢绞线预应力在非常大的情况下,才能抵抗侧向车辆荷载引起的变形,而实现较高的钢绞线预应力张拉对设备要求较高。侧面土体刚度为 320 N/mm 时能够有效抵抗侧向车辆荷载引起的变形,可对回填土进行夯实或者采用碎石土类、爆破石渣、废弃混凝土碎块回填。

### 参考文献(References):

- [1] 胡翔,刘硕,宋哲,等. 套筒灌浆连接预制拼装综合管廊节点受力性能试验研究[J]. 施工技术,2018,47(12):122-125.  
HU Xiang,LIU Shuo,SONG Zhe,et al. Experimental study on mechanical properties of joints in precast assembled utility tunnel connected with grouting sleeve[J]. Construction Technology,2018,47(12):122-125.
- [2] 唐华春. 纵向连接接头对预制综合管廊受力性能影响研究[D]. 长春:吉林建筑大学,2019.  
TANG Huachun. Research on the influence of longitudinal connection joints on the mechanical performance of prefabricated integrated pipe gallery[D]. Changchun:Jilin Jianzhu University,2019.
- [3] 顾卫兵,冯宇韬,刘江涛,等. 预制装配式管廊受力性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):91-97.  
GU Weibing,FENG Yutao,LIU Jiangtao,et al. Experimental research on mechanical performance of prefabricated utility tunnel[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2020,18(1):91-97.
- [4] 王恒栋. 我国城市地下综合管廊工程建设中的若干问题[J]. 隧道建设,2017,37(5):523-528.  
WANG Hengdong. Several problems about urban underground utility tunnel during construction in China[J]. Tunnel Construction,2017,37(5):523-528.
- [5] 黄剑,王恒栋,王建. 软土地基综合管廊沉降控制、监测与分析[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(S2):845-859.  
HUANG Jian,WANG Hengdong,WANG Jian. Settlement control,monitoring and analysis of utility tunnel on soft soil foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2018,14(S2):845-859.
- [6] 崔龙飞,许大鹏. 缆线型综合管廊设计要点探讨[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(3):871-877.  
CUI Longfei,XU Dapeng. Discussion on key design points of cable utility tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2019,15(3):871-877.
- [7] 徐健,谢忠球,吴敬龙. 交通荷载下预制综合管廊受力特性研究[J]. 振动. 测试与诊断,2021,41(2):377-384.  
XU Jian,XIE Zhongqiu,WU Jinglong. Analysis of mechanical characteristics of prefabricated pipe gallery under traffic load[J]. Journal of Vibration,Measurement & Diagnosis,2021,41(2):377-384.
- [8] 徐健,谢忠球,吴敬龙. 车辆荷载作用下综合管廊变形特性研究[J]. 建筑结构,2019,49(S1):845-849.  
XU Jian,XIE Zhongqiu,WU Jinglong. Study on the deformation characteristics of integrated pipe gallery under vehicle load[J]. Building Structure,2019,49(S1):845-849.
- [9] 全勇. 车辆荷载作用下老城区支线地下综合管廊的响应分析[D]. 西安:西安科技大学,2017.  
QUAN Yong. The response analysis of branch utility tunnel in old urban district under vehicle load[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2017.
- [10] 李磊. 车辆荷载下综合管廊与土体的力学性状分析[D]. 杭州:浙江科技学院,2018.  
LI Lei. Analysis of mechanical properties of utility tunnel and soil under traffic loading[D]. Hangzhou:Zhejiang University of Science & Technology,2018.
- [11] GB 50838—2015,城市综合管廊工程技术规范[S].  
GB 50838—2015,Technical code for urban municipal tunnel engineering[S].
- [12] 王建,李茂,付伟庆. 多舱组合预制拼装预应力地下综合管廊有限元分析[J]. 特种结构,2021,38(3):42-48.  
WANG Jian,LI Mao,FU Weiqing. Finite element analysis of fabricated precast prestressed underground multi-compartment utility tunnel[J]. Special Structures,2021,38(3):42-48.
- [13] 许有俊,董文秀,裴学军. 矩形顶管 F 型承插接头抗剪刚度及影响因素研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(S2):84-91.  
XU Youjun,DONG Wenxiu,PEI Xuejun. Shear stiffness and influencing factors of F-type socket joint of rectangular pipe jacking[J]. Tunnel Construction (English-Chinese),2021,41(S2):84-91.
- [14] 胡翔,薛伟辰. 预制预应力综合管廊受力性能试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(5):29-37.  
HU Xiang,XUE Weichen. Experimental study of mechanical properties of PPMT[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(5):29-37.
- [15] GB 50007—2002,建筑地基基础设计规范[S].  
GB 50007—2002,Code for the design of building foundations[S].

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)