

大直径盾构隧道内高速列车振动下管片 接缝变形与防水性能仿真分析*

杜佳骏¹ 吴悦¹ 郑长青² 齐春² 霍永鹏¹ 晏启祥¹

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 610031, 成都; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都)

摘要 [目的] 为防治大直径盾构隧道渗漏水病害, 保障高速列车行驶安全与隧道正常运营, 必须对高速列车振动下的隧道管片接缝变形与防水性能进行分析研究。[方法] 依托湛江湾海底隧道工程, 利用有限元软件建立地层-隧道三维模型与密封垫-沟槽二维精细化模型。首先以纵缝为例研究了大直径盾构隧道内高速列车振动下管片位移动力响应与管片接缝变形特征, 然后基于最不利管片接头变形工况分析了一种密封垫防水性能。[结果及结论] 单列高速列车振动下管片接缝位移响应过程分为变形增加、变形危险与变形消退 3 个阶段; 变形危险阶段管片环上部与左右两端处接缝张开且错台量较大, 邻近接缝受两侧管片挤压作用张开且错台变小; 轨道道床下接缝几乎无变形, 轨道道床会大大减弱列车振动对管片衬砌的影响; 密封垫与密封垫间接触应力呈 U 形分布, 密封垫与管片沟槽间接触应力由中间接触部位向两边逐渐减小; 相较于密封垫与管片沟槽间接触路径, 密封垫与密封垫间接触面更易发生渗漏水。在本工程的最不利工况下, 提供的一种三角形开孔密封垫能满足本隧道防水要求。

关键词 大直径盾构隧道; 高速列车振动; 管片接缝; 密封垫防水

中图分类号 U456.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.030

Simulation Analysis of Segment Joint Deformation and Waterproof Performance under High-speed Train Vibration in Large-diameter Shield Tunnel

DU Jiajun¹, WU Yue¹, ZHENG Changqing², QI Chun², HUO Yongpeng¹, YAN Qixiang¹

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] To prevent water leakage issues in large-diameter shield tunnel, ensure high-speed train operation-

al safety and normal tunnel functionality, it is necessary to carry out analysis and research on tunnel segment joint deformation and waterproof performance under high-speed train vibration. [Method] Relying on the Zhanjiang Bay Subsea Tunnel project, a soil-tunnel three-dimensional model and a sealing gasket-groove two-dimensional refined model are established using finite element software. First, the dynamics response and deformation characteristics of segment joints under high-speed train vibration in large-diameter shield tunnel are studied, with longitudinal joints as example. Then, the waterproof performance of a sealing gasket is analyzed based on the most adverse joint deformation working condition. [Result & Conclusion] The research results indicate that under the vibration of a single high-speed train, the displacement response process of segment joints can be divided into three stages: deformation increase, deformation being danger, and deformation decline. During the second stage, significant joint opening and misalignment occur at the upper part and both ends of the segment ring, while adjacent joints experience reduced opening and misalignment due to compression from both adjacent side segments. There is almost no deformation at the joints below the track bed, as the tunnel track bed significantly mitigates the impact of train vibration on segment linings. The contact stress between sealing gaskets follows a U-shaped distribution, decreasing from the central contact area towards both edges between the sealing gasket and the segment groove. Leakage is more likely to occur at the contact surfaces between the sealing gaskets than along the contact path between the sealing gasket and the segment groove. Under the most adverse working condition of this project, a provided triangular perforated sealing gasket is found to meet the tunnel waterproof requirements.

Key words large-diameter shield tunnel; high-speed train vibration; segment joint; sealing gasket waterproof

隧道内高速列车振动常会引起管片接缝处产

* 国家自然科学基金项目(51878573, U21A20152)

生较大变形,进而导致管片出现渗漏水现象。渗漏水病害的发生不仅影响隧道正常运营,也会使衬砌管片结构及内部设施受到损坏^[1]。因此,为保障隧道运营期间安全性与耐久性,对列车振动下隧道管片接缝变形与防水性能的分析显得十分必要。

评估盾构隧道管片的防水性能,关键在于其防水薄弱部位即管片接缝处的防水设计^[2]。目前,管片接缝处主要以设置弹性橡胶密封垫的方式来抵抗水压,针对该领域已有众多学者展开研究。文献[3]研制了密封垫水密性试验装置,分析了单道及双道密封垫的最大设防压力与失效模式;文献[4]结合数值模型与接缝防水试验,确定了强震作用下管片接缝张开量,优化了密封垫及沟槽构造;文献[5]运用 ANSYS-PDS 模块开展了密封垫防水性能的参数灵敏度分析。前人在理论、试验及数值模拟上已取得丰硕成果,但高速列车振动作用对大直径盾构隧道管片接缝变形及接缝密封垫防水性能的影响研究还较为少见。

鉴于此,本文依托湛江湾海底隧道工程,采用有限元分析方法,先后建立“地层-隧道”三维实体模型与“密封垫-沟槽”二维精细化模型,研究了大直径盾构隧道内高速列车振动下管片的位移动力响应规律,并结合管片接缝张开与错台变形特征,进一步对密封垫防水性能展开分析。

1 工程概况

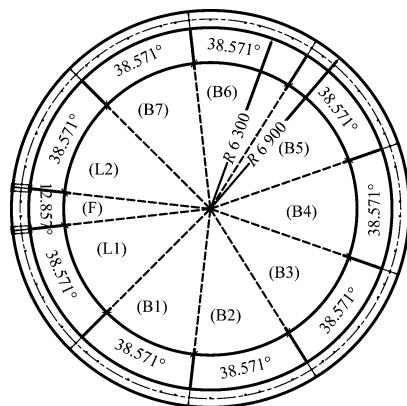
湛江湾海底隧道下穿湛江海湾,具有大直径、高水压、地层软弱、列车行车速度高等显著特点。该隧道全长 8 550 m,采用盾构法与明挖法修建。其中隧道盾构段为单洞双线断面,预制装配式管片

衬砌支护。管片衬砌内径 12.6 m,外径 13.8 m,幅宽 2.0 m。管片环采用“1+2+7”分块方式,分块方案如图 1 所示。管片以错缝形式拼装,接缝均采用斜螺栓连接。环间采用 42 只 M36 纵向斜螺栓连接,每环内采用 36 只 M36 环向斜螺栓连接。

2 列车振动下管片接缝变形分析

2.1 列车振动下大直径盾构隧道三维实体模型

为客观准确反映隧道结构在动荷载下的动力响应,目前经验做法是以隧道结构宽度的 6~10 倍范围作为计算区域,因此取模型整体尺寸为长 104 m、宽 54 m、高 84.8 m,建立图 2 所示地层-盾构隧道三维实体模型。模型中设置隧道埋深 26 m,顶面压力水头为 6 m,并依据工程地勘资料,简化地层由上至下依次为黏土层、粉质黏土层及粗砂层,土层与隧道结构材料的物理力学参数见表 1。

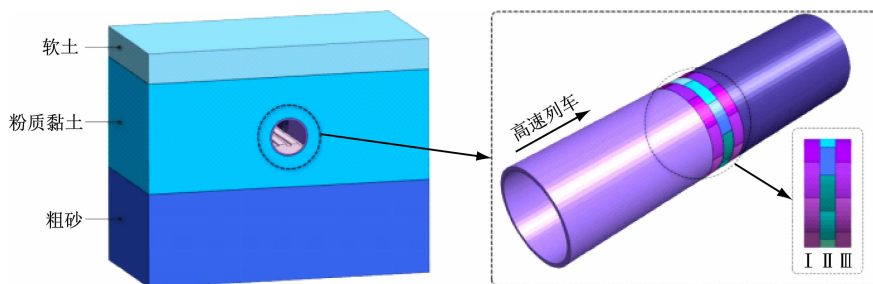


尺寸单位:mm

注:F为封顶块;L1与L2为邻接块;B1至B7为标准块。

图 1 管片环横断面

Fig. 1 Profile of segment ring



注:I、II、III为管片编号。

图 2 地层-隧道三维模型

Fig. 2 Soil-tunnel 3D model

图 2 为地层-隧道三维模型。考虑到模拟接缝的非线性界面单元太多会降低计算效率,故只在隧

道中间分析部位局部进行装配式管片模拟,隧道其余通环管片则按照式(1)、式(2)等效抗弯刚度计算

表 1 模型材料参数

Tab. 1 Model material parameters

材料	重度/ (kN/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
黏土	17.5	2.15	0.41	9	5
粉质黏土	20.1	5.61	0.35	28	14
粗砂	21.0	25.00	0.25	0	35
衬砌	25.0	3.45 × 10 ⁴	0.17		
道床	23.0	3.45 × 10 ⁴	0.17		

公式进行刚度等效^[6],近似模拟管片接头效应。

$$EI = \frac{\cos^3 \varphi}{\cos \varphi + \left(\frac{\pi}{2} + \varphi \right) \sin \varphi} E_s I_s \quad (1)$$

$$\varphi + \cot \varphi = \pi \left(0.5 + \frac{K}{E_s A_s / b} \right) \quad (2)$$

式中:

EI ——等效刚度, E 为等效弹性模量, I 为隧道横截面等效惯性矩;

φ ——衬砌圆环中性轴在圆环上的割线所对中心角的补角之半;

E_s ——衬砌弹性模量;

A_s ——衬砌圆环截面面积;

I_s ——圆环截面惯性矩;

K ——弹簧抗拉刚度;

b ——衬砌环幅宽。

折减后衬砌的等效抗弯刚度为 $1.3 \times 10^9 \text{ kNm}^2$ 。选择直接积分法的动力时程分析,通过特征值求解使用模态阻尼计算。采用移动轮载法模拟作用于右线道床上的列车荷载,即采用一激振力函数来表达列车振动所产生的竖向激振荷载,将竖向振动荷载施加于右线道床,且荷载作用点以列车实际前进速度向前移动。列车编组总长度为 262 m,列车车速为 350 km/h,形成的移动列车荷载时程曲线如图 3 所示。为了避免散射波在模型边界上的反射现象影响数值计算结果,在模型四周生成黏弹性边界并固定模型底部。

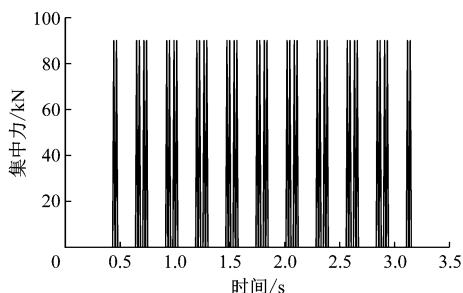


图 3 列车振动荷载时程曲线

Fig. 3 Time history curve of train vibration load

2.2 列车振动下管片接缝的张开与错台

因篇幅有限,下文所指接缝均以图 1 管片纵缝为例展开分析。选取隧道中心Ⅱ管片(见图 2)为特征管片环,在高速列车稳定驶过隧道阶段,管片环拱顶、拱腰、拱脚及拱底处的接缝变形量变化如图 4 所示。接缝变形量定义为接缝变形后相邻衬砌接缝面形心的相对位移量。

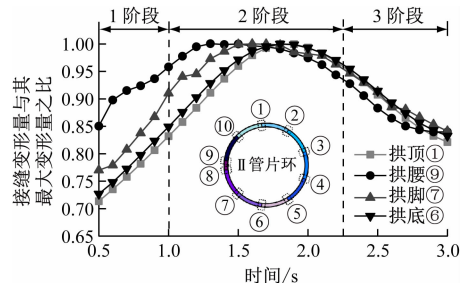


图 4 列车振动下管片接缝变形量与其最大变形量之比随时间变化曲线

Fig. 4 Curves of the ratio of segment joint deformation to its maximum deformation changing over time under train vibration

由图 4 可知,当单列高速列车驶过隧道时,衬砌环各接缝面位移动力响应规律相似,可划分为 3 个阶段:1 阶段为变形增加阶段(0.50 ~ 1.00 s),本阶段列车刚进入隧道,列车振动引起接缝两侧衬砌相对变形快速增加,其中拱腰处接缝面⑨变形响应最早;2 阶段为变形危险阶段(1.00 ~ 2.25 s),本阶段列车行驶在隧道内,接缝面变形较大且保持在最大变形量的 95% 以上;3 阶段为变形消退阶段(2.25 ~ 3.00 s),此阶段列车逐渐驶离隧道,接缝面两侧相对变形逐渐减小,在 3.00 s 时刻各接缝面变形值较峰值已下降了约 17%。

提取变形危险阶段 1.8 s 时刻下Ⅱ管片环各接缝面的张开量与错台量,绘制图 5 所示管片接缝变形柱状图。在高速列车振动影响下管片环接缝面发生相对变形,其中上部及左右两端处接缝面①、③、⑨张开量与错台量较大;相应地,邻近接缝面②、⑧、⑩受两侧管片挤压作用张开量与错台量较小。由于模拟高速列车正驶过隧道右侧道床,靠近右侧道床的接缝面④张开、错台量亦较大,而接缝面⑤、⑥、⑦张开与错台量皆微小,这是列车振动经道床传递后对管片衬砌的影响大大减弱的表现。由图 5 可知,Ⅱ管片环接缝面⑨出现了最大张开量与错台量,因此本文保守取张开量 5 mm、错台量 7 mm 为本工程大直径盾构隧道管片防水计算最不利工况,以进一步分析管片接缝密封垫的防水有效性。

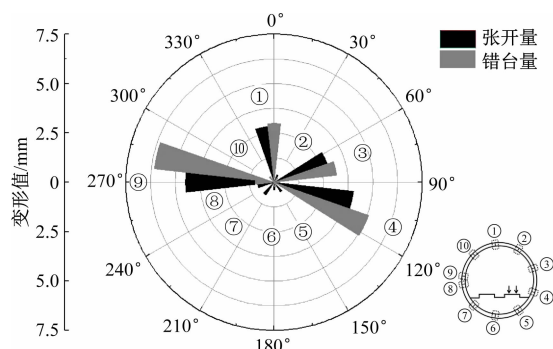


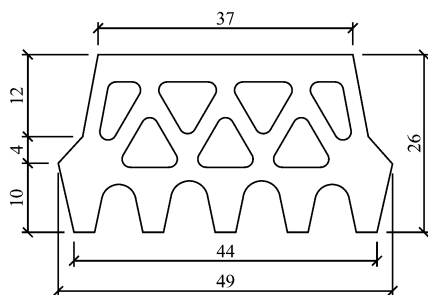
图5 列车振动下管片接缝张开与错台量

Fig. 5 Segment joint opening and misalignment under train vibration

3 列车振动下密封垫防水性能分析

3.1 密封垫-管片沟槽二维精细化模型

针对本工程,提供一种三角形开孔密封垫,其截面具体尺寸见图6。采用 Abaqus 软件建立密封垫-管片沟槽二维有限元模型如图7所示。模型管片用刚体模拟,密封垫部分由线性平面应变单元构成。



尺寸单位:mm

图6 密封垫截面尺寸

Fig. 6 Dimension of sealing gasket section

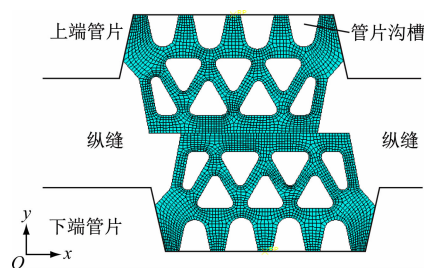


图7 密封垫-管片沟槽二维模型网格

Fig. 7 2D model grid of sealing gasket-segment groove

数值模型中,密封垫本身及各孔洞部分创建自接触,密封垫与密封垫、密封垫与管片沟槽间创建表面与表面接触,其中接触属性切向行为采用罚函数摩擦,摩擦因数设为0.5,法向行为选择硬接触。在模型边界与加载方面,应控制沟槽耦合点完全固

定下端管片,约束上端管片 x 方向自由度并施加 $-y$ 方向位移荷载,通过管片闭合压缩与密封垫间错开模拟密封垫防水最不利工况(张开量5 mm、错台量7 mm)。橡胶密封垫采用 Yeoh 三参数超弹性本构模型,其应变能函数表达式如式(3)所示。

$$W = C_{10}(\gamma_1 - 3) + C_{20}(\gamma_2 - 3)^2 + C_{30}(\gamma_1 - 3)^3 \quad (3)$$

式中:

W ——应变势能;

γ_1, γ_2 ——应变张量不变量;

C_{10}, C_{20}, C_{30} ——材料常数,模型中分别取0.682 8、-0.100 4、0.031 3^[7]。

3.2 最不利工况下接缝密封垫防水性能

管片接缝防水存在两条薄弱路径——密封垫与密封垫间(路径1)、密封垫与管片沟槽间(路径2)。为了验证管片接缝防水效果,提取上述两条路径接触面上的接触应力,如图8和图9所示。其中,防水设计水压由本隧道盾构段承受最大水压确定为0.60 MPa。

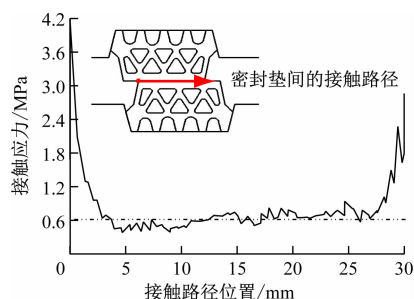


图8 密封垫-密封垫间接触应力分布

Fig. 8 Distribution of contact stress between sealing gaskets

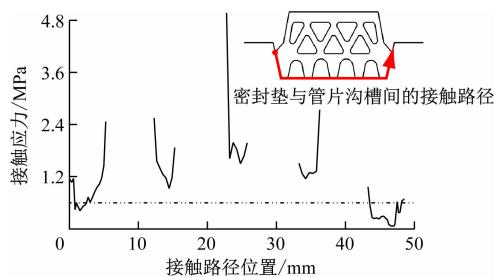


图9 密封垫-管片沟槽接触应力分布

Fig. 9 Distribution of contact stress between sealing gasket and segment groove

由图8可知,路径1应力呈U形分布,接触应力最大值接近4.2 MPa;由图9可知,路径2接触应力表现出由中间接触部位向两边逐渐减小的趋势,接触应力最大值接近5 MPa。路径2接触应力整体大于路径1接触应力,且由密封垫水平变形云图

(见图 10)可知,密封垫与密封垫间接触部位附近产生的水平变形明显大于与沟槽相接的密封垫部分,表明密封垫间接接触面发生渗漏水的概率更大。

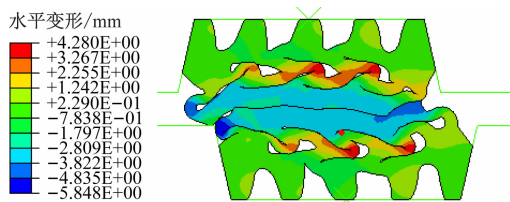


图 10 密封垫水平变形云图

Fig. 10 Nephogram of gasket horizontal deformation

根据已有密封垫防水评价方法研究,采用密封垫接触面平均接触应力来表征密封垫防水能力,当密封垫平均接触应力大于或等于设计水压时,认为接缝密封垫防水有效;反之,则认为防水失效。基于图 8 与图 9,计算得到路径 1 平均接触应力为 0.784 MPa,路径 2 平均接触应力为 1.043 MPa,两者平均接触应力在保证施工安装质量前提下均大于设计水压,验证了该大直径盾构隧道管片接缝密封垫在高速列车振动下的防水效果是可行、安全的,满足防水设计要求。

4 结语

研究了高速列车振动下大直径盾构隧道管片的位移动力响应规律,得到了管片接缝张开与错台变形特征,分析了最不利工况下密封垫防水性能。主要结论如下:

1) 单列高速列车振动下管片接缝位移变化过程可划分为 3 个阶段:变形增加阶段(1 阶段)、变形危险阶(2 阶段)与变形消退阶段(3 阶段)。1 阶段拱腰处变形响应最早;2 阶段接缝面相对变形较大且保持在变形峰值 95% 以上;3 阶段列车驶离隧道,接缝面变形逐渐减小。

2) 管片环各接缝面受高速列车振动影响变形各异。上部及左右两端处接缝面张开量与错台量较大,邻近接缝受两侧管片挤压作用张开与错台变小。道床下接缝几乎无变形,即列车振动经道床传递后对管片衬砌影响大大减弱。

3) 密封垫与密封垫间接接触应力呈 U 形分布,密封垫与管片沟槽间接接触应力由中间接触部位向两边逐渐减小。密封垫与管片沟槽间接接触应力整体大于密封垫与密封垫间接接触应力,渗漏水现象最可能从密封垫间接接触面开始。

4) 一种三角形开孔密封垫,在本工程最不利工

况下(张开量 5 mm、错台量 7 mm)密封垫与密封垫间接接触应力平均值为 0.784 MPa,密封垫与管片沟槽间接接触应力平均值为 1.043 MPa,均大于设计水压 0.600 MPa,满足设计防水要求。

参考文献

- [1] 周彩荣. 武汉某地铁盾构隧道运营期常见病害原因分析及治理措施[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(12): 153.
ZHOU Cairong. Analysis of common diseases in metro shield tunnel during operation period and the control measures[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(12): 153.
- [2] 杨贵生, 李宏亮, 丁超, 等. 地铁盾构隧道衬砌管片密封槽尺寸优化分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 1): 93.
YANG Guisheng, LI Hongliang, DING Chao, et al. Optimization analysis of sealing groove of lining segment of subway shield tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 93.
- [3] 李雪, 霍鹏, 周顺华, 等. 盾构隧道双道密封垫防水能力及失效模式研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 159.
LI Xue, HUO Peng, ZHOU Shunhua, et al. Test research on watertight mechanism and failure model of the double sealing gaskets in shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 159.
- [4] 谢宏明, 杜彦良, 何川, 等. 强震作用下大断面海底盾构隧道管片环缝防水性能[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 201.
XIE Hongming, DU Yanliang, HE Chuan, et al. Waterproof performance of segment joints of large section subsea shield tunnel under strong earthquake[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 201.
- [5] 雷震宇, 刘明. 具有随机参数的盾构管片弹性密封垫防水性能优化分析[J]. 应用数学和力学, 2017, 38(8): 899.
LEI Zhenyu, LIU Ming. Waterproofness optimization for elastic rubber gaskets in shield tunnels with random parameters[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2017, 38(8): 899.
- [6] 张志强, 朱敏, 何川. 盾构隧道纵向刚度计算方法以及影响因素研究[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(增刊 1): 198.
ZHANG Zhiqiang, ZHU Min, HE Chuan. Study on calculation method and influencing factors of longitudinal stiffness of shield tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(S1): 198.
- [7] 郭志明, 李拼, 鲁志鹏, 等. 水压施加对盾构管片接缝防水性能的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(7): 149.
GUO Zhiming, LI Pin, LU Zhipeng, et al. Analysis of the influence of water pressure on the waterproof performance of shield segment joints[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(7): 149.

· 收稿日期:2022-03-30 修回日期:2022-05-24 出版日期:2024-08-10

Received:2022-03-30 Revised:2022-05-24 Published:2024-08-10

· 第一作者:杜佳骏,硕士研究生,1294246662@qq.com

通信作者:晏启祥,教授,764365015@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license