

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.082



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



盾构隧道管片的偏心抗弯承载特性

黄应州¹, 陈文¹, 何齐海², 吴志昊², 杨阳³, 仇文岗³, 杨文钰³, 孙伟鑫³

(1. 厦深铁路广东有限公司, 广东 深圳 518052; 2. 中铁二局集团有限公司, 成都 610031;

3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 盾构隧道管片的抗弯承载力对隧道建设至关重要, 足够的抗弯承载力能保障隧道工程的整体稳定和安全。目前对盾构隧道管片抗弯承载力的研究不足, 难以全面预测盾构隧道管片在实际工况中的表现。基于标准的盾构隧道管片抗弯承载力检测方法, 结合足尺抗弯试验, 对深汕铁路龙岗盾构区间的盾构隧道管片抗弯承载力进行测试, 使用规范推荐的设计计算方法对足尺管片抗弯试验的有效性进行验证, 采用有限元数值模拟方法进一步分析偏心受压状态下的管片抗弯承载性能。结果表明, 随着荷载施加位置越靠近盾构隧道管片的端部, 管片能承受的壓力也随之增加, 管片中心位置所需提供的抗弯承载力逐渐降低, 端部所需提供的抗弯承载力呈现先增大后减小的变化规律; 将理想状态下管片能承受的极限承载力施加在各偏心工况下时, 管片中心的位移逐渐降低, 端点位移呈现出先增大后减小的变化趋势。

关键词: 盾构隧道; 衬砌管片; 抗弯承载力; 数值模拟; 偏心荷载

中图分类号: U454 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-07

Eccentric bending bearing characteristics of shield tunnel segments

HUANG Yingzhou¹, CHEN Wen¹, HE Qihai², WU Zhihao², YANG Yang³,

ZHANG Wengang³, YANG Wenyu³, SUN Weixin³

(1. Xiamen Shenzhen Railway Guangdong Co., Ltd., Shenzhen 518052, Guangdong, P. R. China; 2. China Railway No. 2 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The flexural bearing capacity of shield tunnel segments is crucial for tunnel construction, as sufficient flexural bearing capacity ensures the overall stability and safety of tunnel engineering. Currently, there is insufficient research on the flexural bearing capacity of shield tunnel segments. This study employs a standardized method for detecting the bending capacity of shield tunnel segments, complemented by full-scale bending tests, to evaluate the bending capacity of segments in the Longgang shield section of the Shenzhen Shantou Railway. The effectiveness of the full-scale bending tests was verified using standard design calculation methods, and the bending capacity of the segments under eccentric compression was further analyzed through finite element numerical simulation methods. The results indicate that as the load is applied closer to the end of the shield tunnel segment, the pressure that the segment can withstand increases. The bending bearing capacity

收稿日期: 2024-08-07

基金项目: 国家资助博士后研究人员计划(GZC20242129)

作者简介: 黄应州(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事工程建设管理及地下工程研究, E-mail: fatjoe@163.com。

Received: 2024-08-07

Foundation item: National Postdoctoral Research Program (No. GZC20242129)

Author brief: HUANG Yingzhou (1980-), senior engineer, main research interest: railway engineering construction, E-mail: fatjoe@163.com.

required at the center of the segment gradually decreases, while the bending bearing capacity required at the end initially increases and then decreases. When the ultimate bearing capacity that the segment can withstand under ideal conditions is applied to various eccentric working conditions, the displacement at the center of the segment gradually decreases, and the displacement at the endpoints shows a trend of initially increasing and then decreasing.

Keywords: shield tunnel; lining segment; flexural bearing capacity; numerical simulation; eccentric load

随着地下空间的开发与利用,盾构工程得到快速发展。盾构隧道管片作为盾构隧道的关键结构部件,是确保盾构工程稳定的关键因素^[1]。管片的设计和施工质量直接影响到地下空间的施工效率和长期稳定,合理的管片设计不仅可以减少施工风险,还能优化空间利用效益,促进地下空间的进一步发展^[2]。盾构隧道管片的抗弯承载力特性对于盾构工程至关重要,直接关系到隧道结构的安全性和稳定性,因此受到许多学者的关注。

已有学者针对盾构隧道管片抗弯承载特性展开了研究。何川等^[3]基于室内模型试验方法,以南京 14.5 m 超大断面的长江盾构隧道为工程背景,研究了盾构隧道管片的结构特性。唐志成等^[4]利用缩尺模型试验方法,探究了盾构隧道管片在不同拼接方式下的结构承载力响应特性。张晓光^[5]通过将小直径管片试验和 Abaqus 数值模拟方法相结合,研究了不同工况下的隧道管片抗弯承载特性,并分析了盾构手孔对管片的刚度影响。王帅帅等^[6]基于实际案例,对比了中国和欧洲规范中关于混凝土构件承载力计算方法的差异。Ye 等^[7]开展了盾构隧道管片横向弯曲刚度有效比模型试验研究,分析了隧道管片局部失效的破坏机理。Chen 等^[8]采用三维有限元数值模拟方法,研究了盾构隧道管片在不同外部荷载作用下的结构响应特性和破坏规律。Song 等^[9]采用简化后的梁-弹簧计算模型对盾构隧道管片的力学性能进行了研究,并通过有限元数值模拟方法开展了对比分析。郭瑞等^[10]考虑盾构隧道管片接头处抗弯刚度与力矩间的相关关系,通过对梁-弹簧计算模型进行改进,探讨了大断面水下盾构隧道管片的承载性能。张厚美等^[11-12]对盾构隧道管片结构进行了足尺抗弯试验,结合试验结果,提出了管片刚度计算方法,并对管片接头的力学性能进行了研究。Zhou 等^[13]基于实验和有限元模拟,揭示了配筋率和轴向加载力对衬砌管片破坏机理和结构响应特性的影响。Liu 等^[14]基于足尺实验,研究了管片接头内力、挠度和破坏特征,并指出接头形式是影响衬砌结构性能的关键。Kroetz 等^[15]基于 FORM 方法和蒙特卡罗模拟技术,探究了管片结构形式和可靠性求解算法之间的耦合关系。Zhang 等^[16]通过 8 组腐

蚀足尺试件的静载试验和有限元模拟,研究了地铁衬砌管片在不同腐蚀条件和加载偏心率下的结构性能退化。

目前关于盾构隧道管片抗弯承载力的研究仍存在不足,难以全面预测盾构隧道管片在实际工况中的表现。在实际工程中,盾构隧道管片受到的外界荷载并非都按照抗弯试验中的理想状态施加在盾构隧道管片上,当盾构隧道周围受到地层不均匀沉降、邻近建筑物施工、地下水渗流等作用影响时,有可能会造成盾构隧道管片受到偏心压力,因此,有必要探究盾构隧道管片在偏心压力下的抗弯承载状态。笔者基于盾构管片足尺抗弯试验,通过规范推荐的设计计算方法和有限元数值模拟软件,对深汕铁路龙岗盾构区间的盾构隧道管片抗弯承载力进行验算,验证了足尺试验和数值模型的有效性,并针对盾构隧道管片偏心受压状态下抗弯承载特性进行研究。

1 工程概况及管片设计方案

1.1 工程概况

深汕铁路龙岗隧道位于广东省深圳市龙岗区,东起龙岗区宝龙街道,向西下穿龙山公墓、积谷田村,南至排塘山隧道南侧,紧邻厦深铁路。深汕 6 标施工范围全长 5.727 km,为单洞双线隧道,主要施工内容包括 1 座工作井、134 m 明洞、100.4 m 矿山法隧道、5 464 m 盾构隧道。盾构隧道分为两段:南约盾构段平面半径为 9 000 m 和 4 100 m,纵向坡度依次为 28‰、9.5‰、3.5‰。两个区间各采用 1 台开挖直径 14.33 m 泥水盾构机施工,管片外径 13.8 m、管片内径 12.6 m,采用 60 cm 厚钢筋混凝土衬砌管片,隧道底部安装弦长 10.13 m 钢筋混凝土箱涵,同步隧道掘进进行施工。

1.2 管片设计方案

1) 设计标准:设计使用年限为 100 a;结构安全等级一级,结构重要性系数取 1.1;抗震设防类别为 C 类,抗震设防烈度为 7 度;衬砌环计算直径变形不大于 3% D (D 为衬砌环外径);施工期管片结构应满足承载能力极限状态,运营期管片结构内外侧裂缝宽度均不大于 0.2 mm,不允许出现贯穿裂缝;施工

期抗浮安全系数不小于 1.05,运营期安全系数不小于 1.1;防水等级为一级,在 100 a 使用期限内,接缝张开 6 mm、错缝 15 mm 时,埋深水头 2~3 倍水压下不渗漏。

2)工程材料:在水压 <0.5 MPa 时,衬砌管片选用 C50 钢筋混凝土;在水压 >0.5 MPa 时,衬砌管片选用 C60 钢筋混凝土(水压 >0.5 MPa);混凝土抗渗等级不低于 P12;钢筋选用 HPB300、HRB400E 型号钢筋;预埋螺套选用聚酰胺材料;环、纵向螺栓的机械性能等级不低于 8.8 级的普通螺栓;注浆管选用聚酰胺材料;定位棒选用 PVC 材质;焊条选用 HPB300-E4303 型焊条以及 HRB400-E5003 型焊条;网状改性聚丙烯纤维掺量为 1.5 kg/m^3 。

3)结构耐久性设计:根据《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB 10005—2010)的要求^[17],为了满足耐久性要求,管片混凝土需要满足以下要求。

水泥应选用品质稳定的普通硅酸盐水泥或硅酸盐水泥,强度等级不低于 52.5,碱含量不应超过水泥重的 0.6%。为了提高抗渗性能,宜掺入优质粉煤灰等矿物掺和料。

细骨料应选用级配合理、质地坚固、吸水率低、空隙率小的洁净天然中粗河沙,也可选用专门机组生产的人工砂,不得使用海砂。

粗骨料:应选用粒形良好、质地坚固、线胀系数小的洁净碎石,采用二级或多级级配骨料混配而成。

拌和用水可采用饮用水,不得采用海水。

3)管片设计参数:管片几何尺寸如图 1 所示。

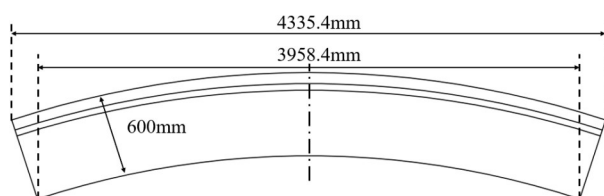


图 1 盾构隧道管片平面视图

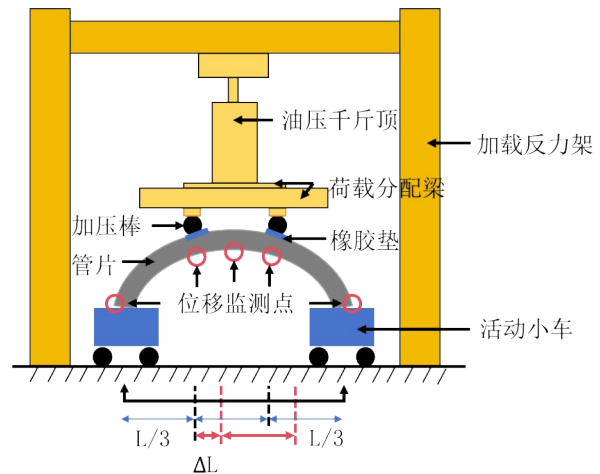
Fig.1 Plan view of shield tunnel segments

2 抗弯承载力检验试验

2.1 抗弯承载力检验装置

为检验盾构隧道管片在施工和运维期间所能承受的最大径向荷载是否符合设计要求,需采用管片抗弯试验对盾构管片的抗弯性能进行检测。基于《盾构隧道管片质量技术检验标准》(CJJ/T 164—2011)^[18],结合图 2 和图 3 所示盾构管片抗弯性能检测装置对盾构隧道管片抗弯承载力进行测试。

检测装置包括 4 个系统:加载系统、支撑系统、测量系统和控制系统。其中,加载系统由油压千斤



注:L为管片跨度; ΔL 为附加荷载距离管片中心的偏心距离。

图 2 盾构管片抗弯性能检测装置

Fig.2 Testing device for flexural performance of shield tunnel segments

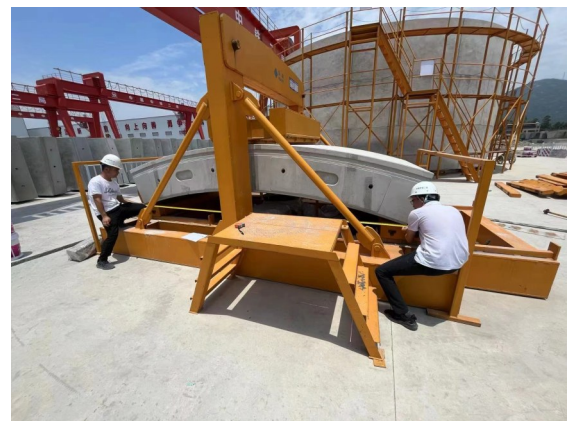


图 3 现场加载试验图

Fig.3 On site loading test diagram

顶、加载反力架、荷载分配梁、加压棒和橡胶垫组成,能够施加可控的竖向荷载;支撑系统由水平向可自由活动的小车组成,用于固定和支撑盾构隧道管片;测量系统由应变片和位移传感器组成,用于测量盾构隧道管片在弯曲变形过程中的结构应变和位移;控制系统由数据采集仪、计算机和控制软件组成,用于实时采集抗弯承载力检验过程中的监测数据。

2.2 抗弯承载力检验方法

根据《盾构隧道管片质量技术检验标准》(CJJ/T 164—2011)的规范要求^[18],加载反力装置所能提供的反力不得小于最大试验荷载的 1.2 倍,支承混凝土管片两端的的活动小车车轮应能沿地面轨道滚动,宜采用油压千斤顶进行加载、卸载,施加给混凝土管片的抗弯荷载应通过荷载分配梁来实现加载点取 $1/3$ 管片跨度。足尺管片抗弯试验步骤如下:

1)将管片平稳放在试验架上,在加载点上垫上厚度不小于 20 mm 的橡胶垫。

2)采用千斤顶分配梁系统加荷,加荷点标距900 mm或设计确定。支承管片两端的小车可沿地面轨道滑动。

3)荷载分组和持续时间符合下列要求:荷载分组应采用分级加荷法;荷载每次加荷10 kN,加荷完成后,静停1 min,记录测试仪显示数据及中心点和加荷点水平位置变量;当出现第一次裂缝后,静停10 min,观察裂缝的开展,并取本级荷载值为开裂荷载实测值。当加荷至测试仪显示数据不再上升时,以此级荷载值为最终破坏荷载,并记录最大裂缝宽度。根据位移变量绘制各中心点、荷载点、水平点变量曲线图记录在不同荷载情况下裂缝出现的位置和裂缝宽度。

2.3 试验检测结果

试验检测结果如图4所示。随着竖向荷载的增加,监测点的水平和竖向位移均增加,当竖向荷载达到728 kN时,荷载点位移值较中心点位移值偏差较大,停止加载。

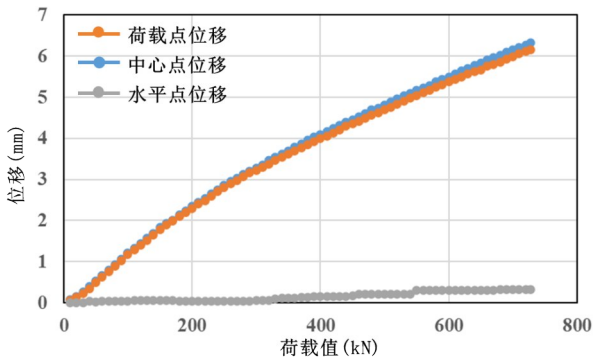


图4 荷载-位移关系图

Fig.4 Load displacement relationship diagram

采用设计规范推荐方法对试验结果进行验证,根据《盾构隧道管片质量技术检验标准》(CJJ/T 164—2011)的要求^[18],对于受弯时不允许出现裂缝的钢筋混凝土构件,在标准组合下,抗裂验算应满足

$$M_k = r_m \alpha_{ct} f_{tk} W_0 \quad (1)$$

式中: r_m 为截面抵抗矩塑性系数,对于矩形截面, r_m 取1.55; α_{ct} 为混凝土拉应力限制系数,对荷载效应的标准组合,取0.85; f_{tk} 为混凝土轴心抗压强度标准值,C60混凝土取2.85 N/mm²; W_0 为换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩,mm²,可根据式(2)计算。

$$W_0 = I_0 / (h - y_0) \quad (2)$$

$$I_0 = I_c + A_c (y_0 - y'_c)^2 + \alpha_E A_s (h_0 - y_0)^2 + \alpha_E A'_s (y_0 - \alpha'_s)^2 y_0 = \frac{A_c y'_c + \alpha_E A_s h_0 + \alpha_E A'_s \alpha'_s}{A_c + \alpha_E A_s + \alpha_E A'_s}$$

式中: A_s 为受拉钢筋截面面积, $A_s = 8237.3 \text{ mm}^2$; A'_s

为受压钢筋截面面积, $A'_s = 6257.3 \text{ mm}^2$; A_c 为混凝土截面面积, $A_c = 1.2 \times 10^6 \text{ mm}^2$; α_E 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值, $\alpha_E = E_s/E_c = 5.8$; h 为截面全高, $h = 600 \text{ mm}$; α_s 为受拉侧混凝土保护层厚度, $\alpha_s = 40 \text{ mm}$; α'_s 为受压侧混凝土保护层厚度, $\alpha'_s = 40 \text{ mm}$; y'_c 为混凝土截面重心至其受压边缘的距离, $y'_c = 300 \text{ mm}$; h_0 为截面有效高度, $h_0 = 560 \text{ mm}$; I_c 为混凝土截面对其本身重心轴的惯性矩, $I_c = (bh^3)/12 = 3.6 \times 10^{10} \text{ mm}^4$ 。将各参数代入式(2)可得极限抗弯承载力为617.99 kN·m。

盾构隧道管片抗弯受力示意图如图5所示。

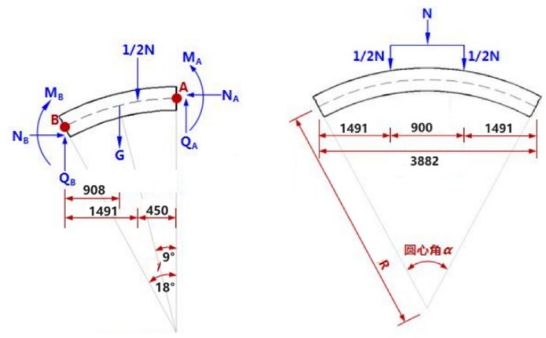


图5 盾构隧道管片抗弯受力示意图

Fig. 5 Schematic diagram of stress during bending resistance of shield tunnel segments

盾构隧道管片的抗弯受力平衡方程为

$$\begin{cases} Q_A + Q_B = N/2 + G \\ N_A = N_B \\ \sum M_B = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由于支撑混凝土管片两端的活动小车车轮可以沿地面轨道滑动,考虑轮胎与地面的滚动摩擦系数(压实道路-气胎轮)为0.03,因此,式(3)可转换为

$$\begin{cases} Q_B = (N + G)/2 \\ Q_A = N/2 + G - Q_B \\ N_A = N_B = 0 \\ \sum M_B = 0 \end{cases} \quad (4)$$

在试验条件下管片达到开裂荷载时的最大竖向承载力理论值为665.41 kN,与试验得到的盾构隧道管片抗弯极限承载力的比值为1.09。由于规范推荐的计算方法不包括因温度变化、干缩等非荷载原因产生的影响,因此,可认为试验结果与计算结果较为吻合,验证了足尺管片抗弯试验的有效性。

3 有限元分析

3.1 模型建立及验证

Plaxis3D是专门为岩土工程领域设计的数值模拟软件,其基于有限元方法,能处理复杂的岩土力

学问题,能准确地模拟地下结构和地基相关的物理现象。采用Plaxis3D数值模拟软件对足尺管片抗弯试验进行模拟,模拟步骤为:

1)基于足尺试验实际工况,采用隧道生成器模块建立盾构隧道管片的三维几何模型,输入相关材料参数,并进行网格划分(如图6所示);

2)确定盾构隧道管片模型边界条件,管片两侧水平方向不设置约束;

3)采用线性荷载模拟抗弯试验中的竖向压力;

4)通过迭代计算求解盾构隧道管片的抗弯承载力。

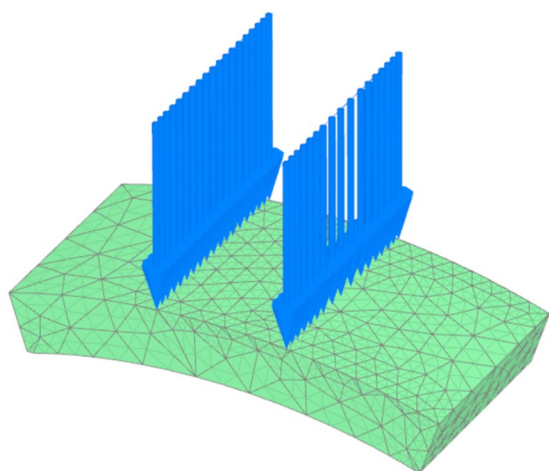


图6 有限元模型

Fig.6 Finite element model

图7为有限元数值模拟和足尺试验得到的竖向荷载与各位置点的位移变化关系图。由图7可见,有限元模型计算得到的结果与试验结果吻合度较高,即有限元模型能较好地模拟盾构隧道管片抗弯加载过程,验证了模型的有效性。

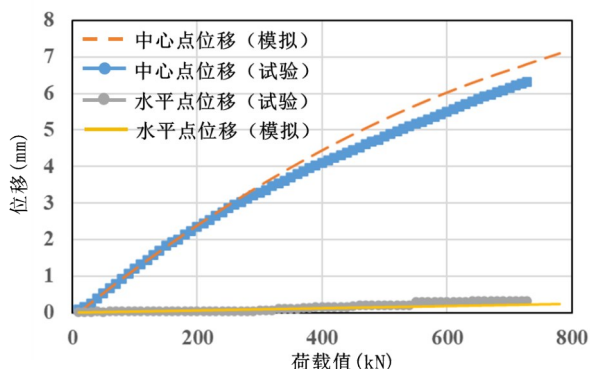


图7 荷载-位移关系图

Fig.7 Load displacement relationship diagram

3.2 偏心受压分析

基于足尺试验的竖向荷载施加方式,每间隔1/24个管片跨度设置一个管片偏心受压工况,共计18个管片偏心受压工况。考虑到足尺管片试验的经

济成本和时间成本等,且建立的有限元数值模型的有效性已得到验证,采用有限元数值模拟方法对盾构隧道管片偏心受压下的抗弯承载性能进行研究。施加在管片上的两线性荷载水平间距不变,两线性荷载中点逐渐与管片中心偏离,从而形成偏心荷载。

图8和图9为管片抗弯性能和结构响应随荷载施加位置的变化。随着荷载施加位置越靠近盾构隧道管片的端部,管片能承受的压力也随之增加。这是由于靠近管片端部的支撑条件更为有利,支撑点附近的结构通常较稳定,能更有效地抵抗施加的外力。施力点离端点越近,管片的受力路径越短,结构的稳定性越高。因此,靠近端点施加力时,管片能更有效地传递和分散外力,减少内部应力集中。

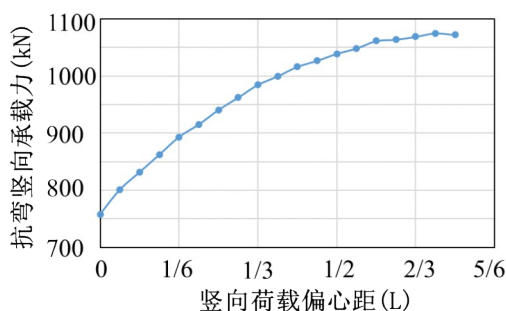


图8 管片抗弯承载力-荷载偏心距离关系图

Fig.8 Diagram of the relationship between the bending vertical bearing capacity of pipe segments and the eccentricity distance of the load

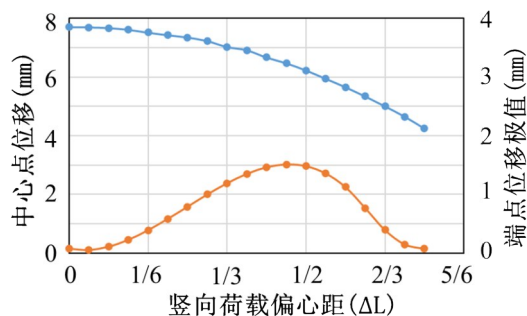


图9 管片中心(端点)位移-荷载偏心距离关系图

Fig.9 Diagram of displacement load eccentricity distance relationship at the center (endpoint) of the pipe segment

将理想状态下的管片能承受的极限承载力施加在各工况下时,管片中心的位移逐渐降低,但端点的位移值呈现出先增大后减小的趋势(如图9和图10所示),这是因为随着外部荷载向盾构隧道端点移动,管片端部所需提供的抗弯承载力逐渐增大,因此,在实际工程中需加强对管片端部区域材料和结构性能的设计,以提高其承载能力,并在管片抗弯试验中增加对端部的检测。

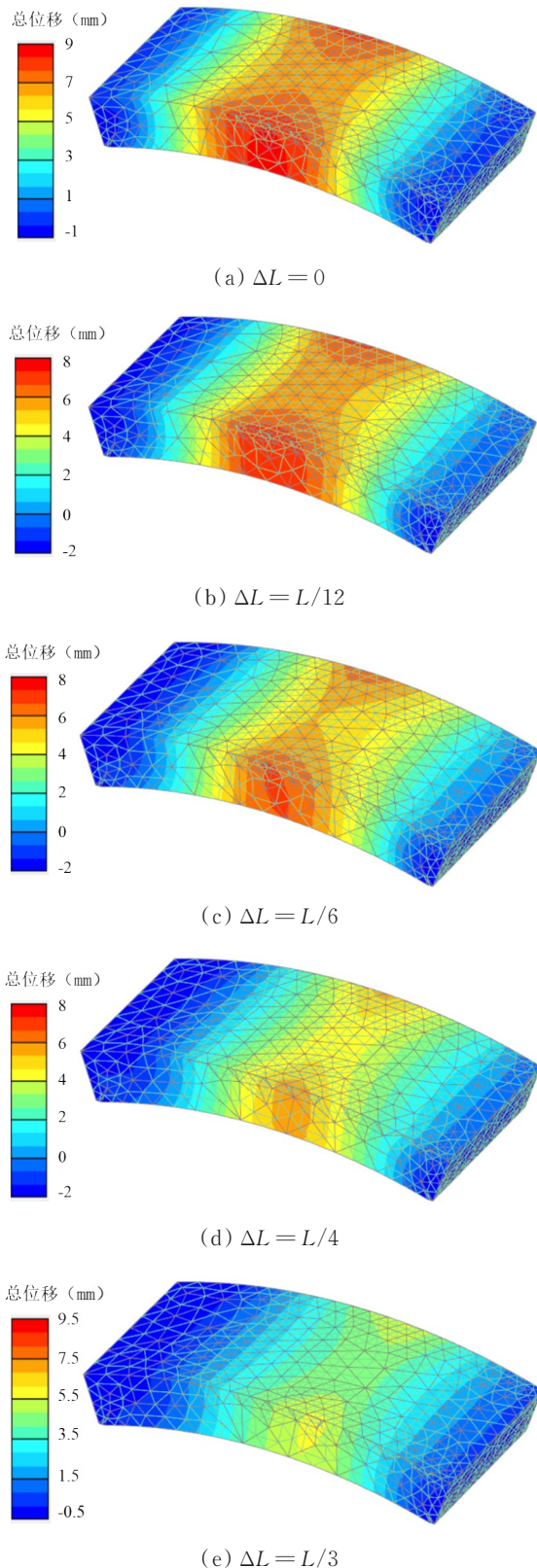


图 10 不同偏心荷载下管片变形云图

Fig.10 Cloud map of pipe deformation under different eccentric loads

4 结论

1) 基于标准化的盾构隧道管片抗弯承载力检测方法, 结合足尺抗弯试验, 对深汕铁路龙岗盾构

区间的盾构隧道管片抗弯承载力进行了测试, 并用规范推荐的设计计算方法验证了足尺管片抗弯试验的有效性。基于深汕铁路龙岗盾构区间的盾构隧道管片抗弯试验, 建立了盾构隧道管片抗弯试验的数值计算模型, 验证了模型的有效性。结合模型, 进一步分析了偏心受压状态下的管片抗弯承载性能。

3) 随着荷载施加位置逐渐靠近盾构隧道管片的端部, 管片能承受的压力逐渐增加。随着外部荷载施加位置向盾构隧道端点移动, 管片端部所需提供的抗弯承载力逐渐增大, 在实际工程中需加强对管片端部区域材料和结构性能的设计, 提高其承载能力, 并在管片抗弯试验中增加对端部的检测。

4) 研究结果可为盾构隧道工程管片抗弯设计提供参考, 但研究尚未考虑管片腐蚀、温度荷载等不良因素的影响, 仍需开展进一步的研究以提高盾构隧道工程质量。

参考文献

- [1] MOLINS C, ARNAU O. Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(6): 764-777.
- [2] 王如路. 上海轨道交通隧道结构安全性分析[J]. 地下工程与隧道, 2011(4): 37-43, 61.
WANG R L. Structural safety analysis of Shanghai rail transit tunnel [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2011(4): 37-43, 61. (in Chinese)
- [3] 何川, 封坤, 杨雄. 南京长江隧道超大断面管片衬砌结构体的相似模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2260-2269.
HE C, FENG K, YANG X. Model test on segmental lining of Nanjing Yangtze River tunnel with super-large cross-section [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2260-2269. (in Chinese)
- [4] 唐志成, 何川, 林刚. 地铁盾构隧道管片结构力学行为模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 85-89.
TANG Z C, HE C, LIN G. Study on mechanical behavior of segment of shield tunnel of metro with model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 85-89. (in Chinese)
- [5] 张晓光. 小直径盾构隧道管片抗弯承载试验研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(6): 521-526.
ZHANG X G. Experimental study on bending performance of small-diameter shield tunnel segments [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(6): 521-526. (in Chinese)
- [6] 王帅帅, 高波, 李志业, 等. 钢筋钢纤维混凝土地下结

- 构构件承载力计算方法研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(5): 1-9.
- WANG S S, GAO B, LI Z Y, et al. Calculation methods for the bearing capacity of SFRC underground structure members [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(5): 1-9. (in Chinese)
- [7] YE F, GOU C F, SUN H D, et al. Model test study on effective ratio of segment transverse bending rigidity of shield tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 41: 193-205.
- [8] CHEN J S, MO H H. Numerical study on crack problems in segments of shield tunnel using finite element method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(1): 91-102.
- [9] SONG K I, CHO G C, CHANG S B, et al. Beam-spring structural analysis for the design of a tunnel pre-reinforcement support system [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 59: 139-150.
- [10] 郭瑞, 何川, 封坤, 等. 大断面水下盾构隧道管片接头抗弯刚度及其对管片内力影响研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(5): 46-53.
- GUO R, HE C, FENG K, et al. Bending stiffness of segment joint and its effects on segment internal force for underwater shield tunnel with large cross-section [J]. China Railway Science, 2013, 34(5): 46-53. (in Chinese)
- [11] 张厚美, 傅德明, 过迟. 盾构隧道管片接头荷载试验研究[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(6): 28-33, 41.
- ZHANG H M, FU D M, GUO C. Study on load test of segment joint in shield driven tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(6): 28-33, 41. (in Chinese)
- [12] 张厚美, 过迟, 付德明. 圆形隧道装配式衬砌接头刚度模型研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 309-313.
- ZHANG H M, GUO C, FU D M. A study on the stiffness model of circular tunnel prefabricated lining [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 309-313. (in Chinese)
- [13] ZHOU H Y, CHEN T G, LI L X. Test and numerical analysis on performance of reinforced concrete segment in subway tunnel [J]. Transactions of Tianjin University, 2012, 18(1): 57-61.
- [14] LIU X, BAI Y, YUAN Y, et al. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of continuously jointed segmental tunnel linings [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016, 12(10): 1364-1379.
- [15] KROETZ H M, DO N A, DIAS D, et al. Reliability of tunnel lining design using the hyperstatic reaction method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77: 59-67.
- [16] ZHANG W P, QIU J L, ZHAO C L. Structural behavior degradation of corroded metro tunnel lining segment [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2024, 20(4): 529-545.
- [17] 铁路混凝土结构耐久性设计规范: TB 10005—2010 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- Code for durability design on concrete structure of railway: TB 10005—2010 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010. (in Chinese)
- [18] 盾构隧道管片质量技术检验标准: CJJ/T 164—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Standard for quality inspection of shield tunnel segment: CJJ/T 164—2011 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese)

(编辑 XXX)