

大直径盾构隧道内部装配式箱涵拼装质量调查研究^{*}孙文昊^{1,3} 张西文^{2**} 刘 燕² 姚 捷^{1,3} 张亮亮^{1,3} 刘广森²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 济南大学土木建筑学院, 250022, 济南;

3. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 430063, 武汉//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 对某在建超大公路和城市轨道交通合建盾构隧道共2 275环装配式大尺寸箱涵拼装质量开展调查研究, 重点关注拼缝宽度、拼缝错台、螺栓质量和轴力变化等质量指标。研究结果如下: ①拼缝质量存在较大的差异性, 拼缝宽度在5~40 mm内数量呈正态分布, 拼装错台主要在2~10 mm内, 部分拼缝错台超过16 mm, 连接螺栓基本完好, 但连接螺栓轴力在外界因素影响下损失严重, 100 d后平均损失率达到51.58%; ②调查分析了拼缝质量差异性的原因, 主要受箱涵预制精度、施工安装精度、后期变形、施工荷载等因素影响; ③提出了研发自适应性强的预制箱涵、提高预制精度、提高施工质量和加强隧道结构变形控制等提高拼装质量的方法。

关键词 盾构隧道; 装配式箱涵; 拼装质量; 张开量; 错台; 螺栓轴力

中图分类号 U455.43; TU201.2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.03.027

Investigation on Assembly Quality of Internal Prefabricated Box Culvert in Large-diameter Shield Tunnel

SUN Wenhao, ZHANG Xiwen, LIU Yan, YAO Jie, ZHANG Liangliang, LIU Guangsen

Abstract The assembly quality of prefabricated large-size box culverts in a super-large shield tunnel with 2 275 rings under joint construction of highway and urban rail transit is investigated, focusing on the quality indicators of seam width, seam staggering ends, bolt quality and axial force variation. Research results are as follows: (1) There is an evidently large difference in the quality of seam, and the number of the seam width in the range of 5–40 mm complies with normal distribution, and the width of most staggering ends is within 2–10 mm while some exceeds 16 mm. The connecting bolts are basically intact, but the connecting bolt axial force loss is severely influenced by external factors, and the average loss rate after 100

days is 51.58%. (2) The reasons for the difference of seam quality are investigated and analyzed, the main influencing factors include box culvert prefabrication accuracy, construction and installation accuracy, later-stage deformation and construction load. (3) Methods to improve the assembly quality such as developing prefabricated box culvert with strong adaptability, improving prefabrication accuracy, improving construction quality and strengthening deformation control of the tunnel structure are put forward.

Key words shield tunnel; prefabricated box culvert; assembly quality; crack size; staggering end; bolt axial force

First-author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

城市隧道工程在合理利用地下空间资源, 推动国家城市化进程方面起到了积极的推动作用^[1-2]。近20年以来, 城市隧道建设在数量、长度上有了质的飞跃, 各种施工方法在应用方面也有了巨大的突破, 大断面道路隧道工程、公路与轨道交通合建隧道工程等高难度隧道也逐渐应用在我国地下工程中^[3]。大直径盾构隧道因为内部空间较大, 内部交通一般为双层行车道或公路与轨道交通合建, 摆脱了传统隧道单层行车的方式, 能够充分利用有限的地下空间资源, 提高地下交通运行效率^[4-5]。公路与轨道交通合建大盾构隧道在我国尚处于起步阶段, 其内部结构和隧道管片相互作用, 且需要应对施工的重荷载和运营期的往复荷载, 使得公路与轨道交通合建大盾构隧道的荷载作用机制更为复杂, 故仍有较多的技术性难题有待解决。

在大盾构隧道内部结构施工技术方面, 传统的现浇模式由于工期长、需现场支模养护等复杂工序, 已不能满足现阶段工程项目的需求^[6]。而装配

^{*} 中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究项目(TSYS DY-JLLCHSD[2020]-06)

^{**} 通信作者

台高度和 11 375 个箱涵连接螺栓进行调查和统计，并对 3 个断面的 9 个箱涵的连接螺栓进行轴力监测。调查中发现部分拼装问题如图 4 所示。

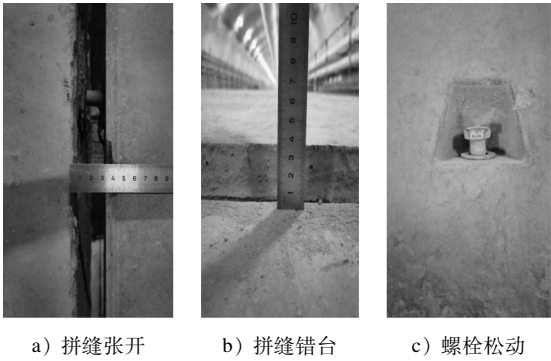


图 4 调查中发现的部分拼装问题

Fig. 4 Partial assembly problems discovered from the investigation

依据统计学的原理,对拼缝张开量、错台量、螺栓轴力损失等变量进行统计分析。结合相关设计、施工和咨询等各方的工程经验,指出箱涵拼装质量的差异性原因并提出相关的改进建议。

2.1 预制箱涵拼缝宽度分析

预制箱涵在拼装和后期施工等影响下产生一定的拼缝。2 275 个箱涵拼缝沿隧道轴向的缝宽分布如图 5 所示,可见拼缝张开量的分布非常不均匀。在第 1250 环—第 1350 环之间,拼缝相对较好,通过现场调查得知该范围内隧道轴线较平缓,箱涵拼装控制较严格。

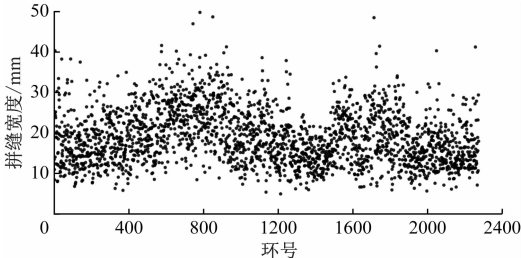
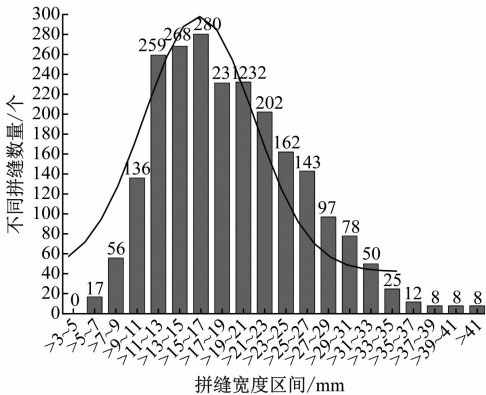


图 5 箱涵拼缝宽度分布情况

Fig. 5 Width distribution of box culvert seams

对不同缝宽的拼缝数量进行统计如图 6 所示,拼缝宽度主要位于 10 ~ 20 mm 之间,存在部分拼缝宽度超过 30 mm 的预制箱涵,且最大值达到了 43 mm。设 x 为拼缝宽度,根据统计分析可得拼缝宽度在 5 ~ 40 mm 服从数学期望值 $\mu = 19.64$, 标准差 $\sigma = 6.89$ 的正态分布情况,概率密度函数表达式 $f(x)$ 为:

$$f(x) = \frac{1}{6.9 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-20.34)^2}{95.22}} \quad (1)$$



注:曲线为式(1)的正态分布曲线。

图 6 内部箱涵不同拼缝宽度的数量统计

Fig. 6 Quantity statistics of different seam widths of internal box culverts

2.2 预制箱涵拼缝错台分析

预制箱涵拼缝错台表现为箱涵表面的不平整,根据调查结果,沿隧道轴向的错台高度的分布如图 7 所示。可见大部分错台能控制在 6 mm 以下,但是也有很多错台分布在 6 ~ 18 mm 之间,表明拼装差异性较大。对不同错台高度的数量进行统计如表 2 所示,错台高度 2 ~ 4 mm 区间的数量最多,大于 12 mm 的错台有 109 个,占比为 4.8%。

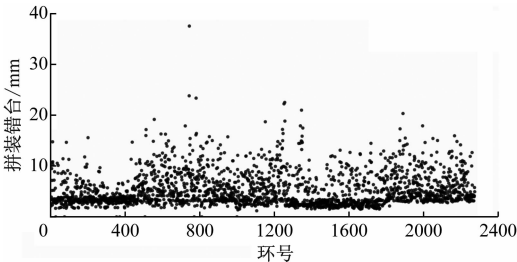


图 7 内部箱涵拼装错台高度统计

Fig. 7 Statistics of internal prefabricated box culvert staggering platform height

表 1 内部箱涵不同拼装错台高度的数量统计

Tab. 1 Quantity statistics of different staggering end heights between internal prefabricated box culverts

拼装错台高度/mm	数量/个	占比/%
0 ~ 2	108	4.8
> 2 ~ 4	1 021	44.9
> 4 ~ 6	453	20.0
> 6 ~ 8	283	12.5
> 8 ~ 10	189	8.3
> 10 ~ 12	108	4.8
> 12 ~ 14	52	2.3
> 14 ~ 16	35	1.5
> 16	22	0.9

2.3 预制箱涵连接螺栓轴力监测

选取 3 个监测断面共 9 个连接螺栓, 安装 DMBH 应变式锚索测力计测量螺栓轴力。分别在安装完成后、安装 10 d 后、安装 40 d 后、安装 60 d 后及安装 100 d 后进行测量, 并计算轴力损失率如表 2 所示。

连接螺栓在安装后承受重型施工车辆的反复作用和隧道自身的变形影响, 在安装 10 d 后, 轴力

的平均损失率为 51.09 % ;安装 40 d 后轴力的平均损失率为 58.36 % ;60 d 后, 平均损失率为 58.2 % ;100 d 平均损失率为 51.58 % 。最差的一根螺栓轴力损失率达到 93.29 % , 已经丧失了紧固力。在安装后 10 d 内螺栓轴力损失最大, 安装后 10 d 至 100 d 内轴力损失相对较小。在第 100 天测试时, 发现部分螺栓轴力增大。根据现场调查发现, 此处拼缝有张开位移, 螺栓受力增大。

表 2 箱涵连接螺栓轴力监测数据

Tab.2 Monitoring data of box culvert connecting bolt axial force

轴力计 编号	安装完成后螺 栓轴力/kN	10 d 后螺栓 轴力/kN	10 d 的螺栓轴 力损失率/%	40 d 后螺栓 轴力/kN	40 d 的螺栓轴 力损失率/%	60 d 后螺栓 轴力/kN	60 d 的螺栓轴 力损失率/%	100 d 后螺栓 轴力/kN	100 d 的螺栓轴 力损失率/%
1-1	72.75	53.31	26.72	43.25	40.55	44.13	39.35	47.50	34.71
1-2	15.38	5.63	63.39	4.75	69.11	4.75	69.11	10.06	34.55
1-3	94.06	65.00	30.90	64.00	31.96	63.25	32.76	73.19	22.19
2-1	40.70	28.10	30.96	25.26	37.92	28.54	29.87	26.35	35.24
2-2	63.44	26.00	59.02	32.19	49.26	35.56	43.94	33.25	47.59
2-3	52.50	25.13	52.13	26.88	48.81	26.88	48.81	34.19	34.88
3-1	64.43	39.89	38.09	22.06	65.76	20.24	68.59	23.44	63.62
3-2	10.25	2.75	73.17	0.69	93.29	0.63	93.90	0.81	92.07
3-3	34.36	5.02	85.39	3.93	88.56	44.13	39.35	47.50	34.71

对螺栓轴力损失率与初始锁紧力的关系作图如图 8 所示。可见结果离散性较大, 大致规律为连接螺栓初始锁紧轴力越大, 轴力损失率相对越低, 反之轴力损失率越大。另外, 轴力的损失与现场的工况、拼缝的质量、施工荷载作用情况等多种因素有关, 仍需作进一步研究。

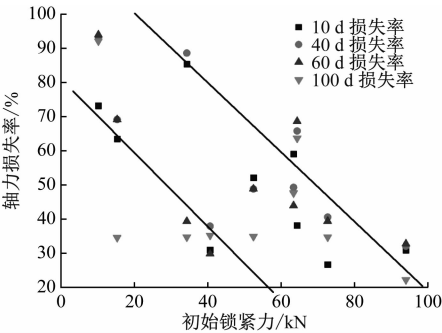


图 8 螺栓轴力损失率与初始锁紧力的关系
Fig.8 Relationship between bolt axial force loss rate and initial locking force

3 箱涵拼缝质量差异性原因分析

通过对箱涵拼缝质量的调查研究, 发现拼缝的缝宽、错台、螺栓轴力等存在较大的差异性。拼装质量参差不齐, 螺栓轴力损失率变化较大。对拼缝质量差异性原因进行分析如下:

3.1 箱涵预制精度影响

隧道内部预制箱涵的发展较晚, 与管片相比, 相对不成熟, 在设计方法、施工技术和预制精度上与盾构管片仍然具有一定的差距。预制箱涵的体量大、模具单一、一次成型, 生产工艺和工序相对较简单。另外在生产、养护和运输过程中边角部位磕碰破损较多。由于部分螺栓孔的预制精度较低, 很多螺栓安装后突出箱涵表面, 在施工车辆的碾压下, 螺栓孔处易发生混凝土破损、垫片断裂等现象。

3.2 施工安装精度影响

1) 预制箱涵是在管片安装完成后, 通过箱涵拼装吊车进行安装。技术人员操作吊车调整箱涵的姿态进行对接。在操作的过程中由于熟练程度的不同存在一定的误差。

2) 预制箱涵拼装在一定程度上受管片安装质量的影响, 预制箱涵直接作用在管片上, 如果管片出现较大的错台或其他偏差, 将会影响箱涵的拼装质量。

3) 箱涵之间的连接只有箱涵顶面的 5 个螺栓, 侧壁、底面等均无连接。相比于管片环向和径向连接, 箱涵之间的连接较弱, 易发生错动和变形。

3.3 后期变形影响

隧道在开挖后土体由于卸荷会发生回弹变形, 衬砌管片受到土压力和地下水浮力的作用, 易引起

管片上浮,由于装配式箱涵的适应性较差,受管片变形的影响较大,易在接缝处发生开合和错动。

3.4 施工荷载影响

大盾构隧道在施工期内箱涵所受的施工荷载有大型的管片运输车、箱涵运输车、砂浆车、吊车等大型车辆荷载。箱涵拼缝处应力和变形较大,且发生振动和累积变形,造成螺栓二次受力和变形,导致拼装接缝质量降低。

4 改进措施与建议

4.1 研发自适应性强的预制箱涵

优化箱涵的结构,增加可调节装置,在隧道线路起伏较大、变坡点、转弯位置等优先使用可调节箱涵。增加箱涵侧面的连接螺栓,提高箱涵之间连接的稳定性。

4.2 提高预制精度

研发更为先进的生产工艺、箱涵模具,提高箱涵的预制精度。在钢筋骨架制作、混凝土浇筑、产品养护、运输等过程严格把关。

4.3 提高施工质量

对箱涵拼装工人进行全方位的学习和培训,提高施工人员的熟练程度。严格控制螺栓连接质量,避免出现螺栓凸出、松动等现象。在施工期内可以对箱涵拼装螺栓进行二次紧固。

4.4 加强隧道结构变形控制

采取多种措施严格控制隧道的后期变形,避免管片变形对箱涵拼装的影响。

5 结语

本文通过对某市政道路和轨道交通合建隧道大尺寸内部预制箱涵拼装质量的调查研究,从统计学的角度分析了拼缝宽度、拼缝错台、螺栓轴力等关键信息。可见箱涵拼缝质量的差异性较大,连接螺栓在安装后 100 d 后轴力损失率平均为 51.58%。调查走访设计、施工、管理等相关技术人员,分析了箱涵拼装质量差异性的原因并提出了相关改进意

见,可供其他类似采用大型内部预制箱涵结构的盾构隧道建设参考。

参考文献

- [1] 董英,张茂省,李宁,等.城市地下空间开发利用的地质安全评价内容与方法[J].水文地质工程地质,2020,47(5):161. DONG Ying, ZHANG Maosheng, LI Ning, et al. Methods and contents of geological safety evaluation for urban underground space development and utilization[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 161.
- [2] WALLACE M I, NG K C. Development and application of underground space use in Hong Kong [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55: 257.
- [3] 洪开荣.我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J].隧道建设,2017,37(2):123. HONG Kairong. Development and prospects of tunnels and underground works in China in recent two years[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 123.
- [4] 肖明清.国内大直径盾构隧道的设计技术进展[J].铁道标准设计,2008,52(8):84. XIAO Mingqing. Progress in design technology of large diameter shield tunnels in China[J]. Railway Standard Design, 2008, 52(8): 84.
- [5] 何应道,孙文昊,唐飞,等.公轨合建盾构法隧道防排水技术研究[J].隧道与轨道交通,2017(增刊1):48. HE Yingdao, SUN Wenhao, TANG Fei, et al. Study on waterproof and drainage technology of shield tunnel constructed by public track[J]. Tunnels and Rail Transit, 2017(S1): 48.
- [6] WANG X, SUN Y, LIU Y. Research on influencing factors of unsafe behavior of prefabricated building [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546(4): 042010.
- [7] 赵海涛.全预制盾构隧道边箱涵精细化施工分析[J].铁道标准设计,2020,64(1):142. ZHAO Haitao. Analysis of precision construction of side box culvert of full prefabricated shield tunnel[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(1): 142.
- [8] RYU H K. Inelastic behaviour of externally prestressed continuous composite box-girder bridge with prefabricated slabs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(7): 989.

(收稿日期:2020-11-15)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821