

城市综合管廊液压模板台车性能测试与结构优化分析

唐进, 万江, 陈鹏旭, 胡伟山, 周迎超, 谷昌满

中国十九冶集团有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2023年8月18日; 录用日期: 2023年9月9日; 发布日期: 2023年9月20日

摘要

为阐明液压模板台车的工作性能, 并提出台车结构优化建议, 设计了性能测试和工程应用试验, 测定了台车框架、内外模板、加强横背楞和对拉螺栓关键节点的应力特征, 明确了各关键节点的工作性能, 借助工程试验验证了台车各部件的适用性, 在此基础上提出了台车结构的优化建议。结果表明, 台车上横梁和底梁最大应力小于30 MPa, 竖梁受力不超过50 MPa, 在混凝土浇筑过程中和浇筑完成后, 台车框架始终处于稳定状态; 内外模板最大应力在20 MPa左右, 外模板应力明显小于内模板, 内外模板加强横背楞最大应力在40~50 MPa之间, 模板结构满足受力要求; 外模板对拉螺栓受力较大, 最大值接近300 MPa, 超过了对拉螺栓材料的屈服强度; 工程试验证明台车各部件基本满足管廊建造要求, 但是综合分析表明工程实践中还需提高外模板对拉螺栓的强度。研究成果可为地下管廊液压模板台车建造技术的应用提供技术参考。

关键词

城市管廊, 模板台车, 应力测试, 内外模板, 对拉螺栓, 结构优化

Performance Test and Structure Optimization Analysis of Hydraulic Formwork Trolley for Urban Integrated Pipe Corridor

Jin Tang, Jiang Wan, Pengxu Chen, Weishan Hu, Yingchao Zhou, Changman Gu

China 19th Metallurgical Group Corporation Limited, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 18th, 2023; accepted: Sep. 9th, 2023; published: Sep. 20th, 2023

文章引用: 唐进, 万江, 陈鹏旭, 胡伟山, 周迎超, 谷昌满. 城市综合管廊液压模板台车性能测试与结构优化分析[J]. 土木工程, 2023, 12(9): 1223-1232. DOI: 10.12677/hjce.2023.129142

Abstract

In order to clarify the working performance of the hydraulic formwork trolley and propose suggestions for the optimization of the trolley structure, the performance test and engineering application test were designed. The stress characteristics of the key joints of the trolley frame, the internal and external formwork, the stiffening cross back and the tension bolt were measured. The working performance of each key node was determined, and the applicability of each component of the trolley was verified by engineering tests. Based on this, the optimization suggestions for the vehicle structure are put forward. The results show that the maximum stress of the beam and bottom beam is less than 30 MPa, and the stress of the vertical beam is less than 50 MPa. The frame of the trolley is always in a stable state during and after concrete pouring. The maximum stress of the inner and outer formwork is about 20 MPa, the stress of the outer formwork is obviously less than that of the inner formwork, and the maximum stress of the inner and outer formwork is between 40 and 50 MPa. Therefore, the formwork structure meets the stress requirements. The tensile force of the outer formwork on the tension bolt is large, and the maximum value is close to 300 MPa, which exceeds the yield strength of the tension bolt material. The engineering test proves that the components of the trolley basically meet the requirements of pipe gallery construction, but the comprehensive analysis shows that the strength of the outer formwork on the bolt should be improved in engineering practice. The research results can provide technical reference for the construction technology of hydraulic formwork trolley for underground pipe corridor.

Keywords

Urban Integrated Pipe Corridor, Formwork Trolley, Stress Testing, Internal and External Formwork, Tension Bolt, Structure Optimization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着中国城市建设的迅速发展,城市人口数量的急剧增长,电力传输、交通及能源问题日益突出。城市综合管廊的建设能够明显缓解人口增长带来的城市问题,对城市发展具有重大意义,也是现代化城市建设中一项比较关键的任务[1]。2013年9月《国务院关于加强城市基础建设的意见》指出开展城市地下综合管廊试点,开展了为期3年在全国36个大中城市全面启动地下综合管廊建设试点工程。2014年6月,国务院办公厅发布关于地下管线建设的指导意见,通过试点示范效应,带动具备条件的城市结合新区建设、旧城改造、道路新(改、扩)建,在重要地段和管线密集区建设综合管廊[2]。2015年4月10日,建设部、财政部公布计划3年内在建设地下综合走廊389公里,总投资351亿元。2016年3月5日,政府工作报告中指出:开工建设城市地下综合管廊2000公里以上。2016年5月26日,建设部、国家能源局印发《推进电力管线纳入城市地下综合管廊的意见》,协调电力管线入廊,进一步增加管廊的综合使用功能[3]。2022年,《国务院关于印发扎实稳住经济一揽子政策措施的通知》和《“十四五”全国城市基础设施建设规划》中指出各地要因地制宜推进城市管廊建设,合理布局规划城市管廊系统[4][5]。目前,全国各省市都在进行地下综合管廊规划,因此完善城市地下管廊综合建造技术具有重要意义。

随着技术的进步,现代地下综合管廊施工建造工艺出现了多种方法,主要包括现浇施工、全预制拼装施工、现浇-预制结合施工和钢制波纹管施工等。现浇施工技术是最为常见的一种方法,现浇法建造管廊的施工工艺简单,技术风险可控。但是,现浇法具有施工周期长,劳动力需求量大,土方开挖量大,箱涵段间容易渗漏,地下水对施工的影响大,主体结构容易出现裂纹等特点,限制了自身发展[6] [7] [8]。全预制拼装施工技术具体成本低、效益高、闭水性能好等优点,但产品规格、地方要求不统一给施工和设计带来困难[9] [10]。预制管廊产品质量要求不一致,设计也无依据,给最终检测和测试数据带来难度。结合预制管廊和现浇管廊的特点,现浇-预制施工技术也是一优势选择[11],但依然无法解决目前的难题。钢制波纹管施工技术跟预制拼装技术相似,是一个预制施工技术,具有施工周期短、工程质量优、安全性高等特点[12] [13]。然而,钢制材料的耐久性不足,很难达到城市综合管廊设计年限 100 年。其次,钢制波纹管施工技术在防渗漏和相邻接口连接都是难点,容易造成质量缺陷。

因此,亟需一种劳动力人口依存度低、更加环保、能实现工业化生产的施工方式,结合现浇法,采用液压模板台车进行城市综合管廊建造技术应运而生。该技术保留现浇工艺操作简单、安全等技术优势,借助台车实现全自动移动作业,高效且有效减少了劳动力的依存度,并且满足绿色环保的建造要求。但是,目前对液压模板台车结构优化分析的相关研究还较少[14]。

鉴于此,设计了液压模板台车性能测试试验和工程应用试验,对液压模板台车的台车框架、内外模板、加强横背楞和对拉螺栓进行应力测试,分析各关键节点的受力特征,借助工程试验分析了液压模板台车各部件设计的适用性,提出了液压模板结构优化方案,研究成果可望为液压模板台车的工程应用推广提供技术参考。

2. 台车结构与试验方案

2.1. 台车结构

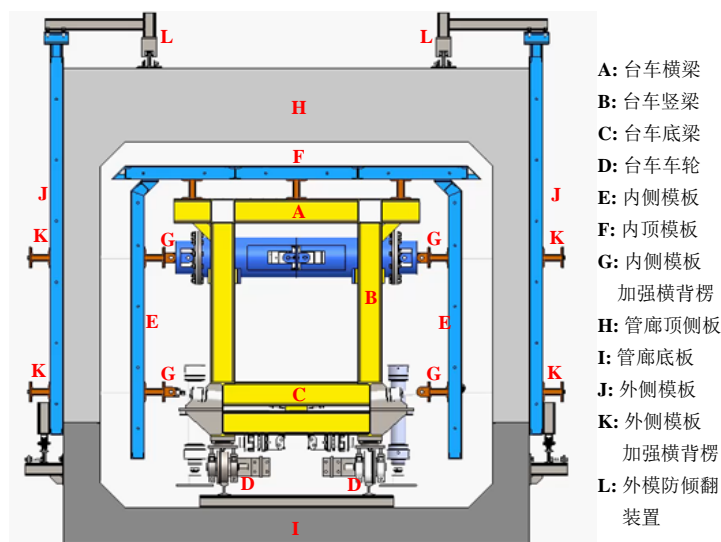


Figure 1. Section view of formwork trolley
 图 1. 模板台车剖视图

液压模板台车由台车、行走机构、内模板、外模板、液压系统和外模防倾翻装置等部分组成。其中,台车框架部分与内顶模板连接,承受模板压力,采用整体性焊接结构。行走机构包括行走轮和行走轨道。每个台车底部设置 4 个行走轮,对称布置在单节台车底部纵梁下,其中主动轮 2 套,从动轮 2 套,均为

直径 250 mm 的槽形轮, 可实现台车的纵向行走运动。走行前轮的设计成万向轮, 可随下部的弯轨实现转向的功能。行走轨道为 16 kg/m 的轻轨。台车行走速度约 5 m/min, 配低转速大扭矩液压马达。

内外模板采用定型钢模板, 厚度为 5 mm, 两侧铣边。模板竖筋为 10#槽钢, 间距 500 mm, 模板两边用角钢钻孔做成法兰盘, 与相邻模板连接。每侧模板设 2 道横背楞, 采用双 16#槽钢, 每道横背楞上安装 4 套(共 8 根)直径 18 mm 的 3 段式对拉螺栓, 与台车上的螺旋丝杆位置相对应。内外模钢板厚度均为 8 mm, 为了便于运输, 模板制作成 2 米一段。液压系统主要为台车行走和模板平移提供动力, 包括 4 个支腿油缸、4 个侧模平移油缸、4 个侧面锁紧油缸、2 个液压马达和 1 套泵站。液压系统通过一台 7.5 kW 的电机提供动力, 工作压力 20 MPa, 流量 14.4 L/min, 工作时溢流阀调定压力为 14 MPa, 液压马达由单向节流阀控制速度。台车、内外模板及对拉螺栓等主要构件均采用弹性模量为 200 GPa 的 Q235 钢材。液压模板台车示意图如图 1 所示。

2.2. 试验方案

利用模板台车进行现浇管廊 1:1 全尺寸试验。管廊试验段长度为 6 m, 浇筑混凝土高 3 m, 顶板混凝土设计厚度为 0.6 m。试验时, 底板和导墙(高 1 m)已完成施工并养护完成, 测试现场如图 2 所示。浇筑混凝土前, 将台车行驶至浇筑节段, 调整好位置, 启动液压泵站, 开启台车顶模和侧模油缸控制操作杆, 使顶板模板和侧模缓慢升至支模位置。通过开启单个或多个油缸, 对局部需要调整位置的顶模和侧模进行微调, 使模板尺寸及位置符合要求, 然后浇筑混凝土。

在浇筑混凝土过程中, 测量台车框架、内外模板、模板加强横背楞和对拉螺栓关键节点的应变值, 通过计算得到关节部位的应力值。测试时间为浇筑混凝土整个过程, 及混凝土浇筑完成后的一段时间。测试采用了 2 台读数设备, 一台为东华 DH3816 静态应变仪, 有 60 测点通道, 每 5 s 采集一个数据; 另外一台为德国 IMC 集成测控有限公司 CRONOScompact 系列, 共 32 个测点通道, 每 1 s 采集一个数据。这两台设备均用于采集关键节点处的应变值。



Figure 2. Test site
图 2. 测试现场

测试前, 首先在关键点位布置应变片, 通过应变测试计算得到应力。应力应变测试点位主要分布在台车、外模板和内模板上, 具体布置位置如图 3、图 4 和图 5 所示。图 3 为台车测试点布置图, 在台车上部横梁布置 4 个测试点, 竖梁布置 2 个测试点, 底梁布置 2 个测试点, 目的在于掌握台车横梁、竖梁和底梁三个关键部位的应力特征。在内模板和内模板加强横背处分别布置 2 个测试点, 以分别测量模板和横背楞的受力特征, 如图 4 所示。图 5 是外模板、外模板加强横背楞和外模板对拉螺栓的应力测试点

布置图。通过对台车、内外模板、加强横背楞和对拉螺栓四种结构关键节点的受力特征进行测试，并与相关规范或标准进行对比，出台车结构的优化方案。

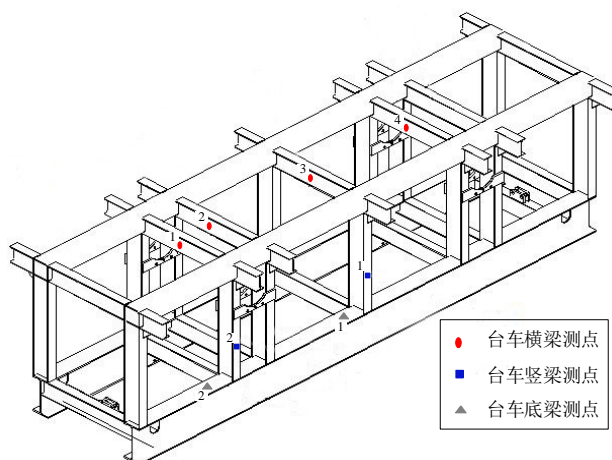


Figure 3. Test point layout on trolley
图 3. 台车测试点布置图

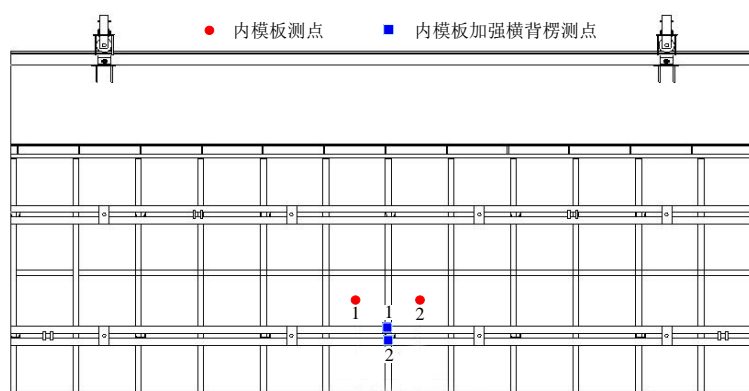


Figure 4. Test point layout on internal formwork
图 4. 内模板测试点布置

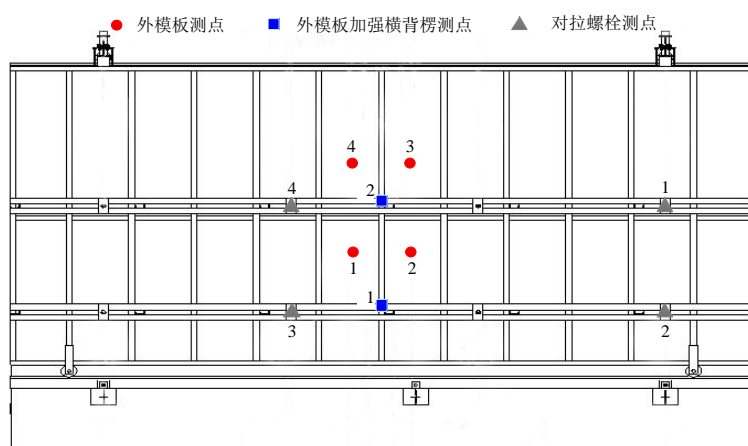


Figure 5. Test point layout on external formwork
图 5. 外模板测试点布置图

3. 现场测试结果与分析

3.1. 台车结构受力分析

地下管廊混凝土浇筑过程中，分别对台车上横梁、竖梁和底梁进行应力测试。图 6 是台车上横梁应力的变化情况。从混凝土开始浇筑 1 小时内，上横梁各测点应力随时间逐渐增加，1 小时后各测点应力逐渐稳定，不再随时间增加。其中，测点 1、2、3 处最大应力不超过 20 MPa，所有测试点最大应力值均小于 25 MPa，满足台车上横梁设计承载要求。必要时，可以考虑适当减小上横梁尺寸，以节约制作成本和台车重量。台车竖梁承受应力情况如图 7 所示，由于应力为压应力，所以用负值表示。在开始浇筑混凝土的一段时间内，竖梁应力增加速率缓慢，在 2500 s 内从 0 逐渐增加至 10 MPa 左右。从 2500 s 后竖梁应力开始急剧增加，在 3000 s 时应力达到 30 MPa 左右。此后，竖梁应力逐渐平稳，随着时间增加，测点 1 处的应力略微增加至 40 MPa 左右，测点 2 处的应力没有明显增加。通过测试可知，所有竖梁所受压力应均远小于钢 Q235 屈服强度，满足台车竖梁承载力设计要求。

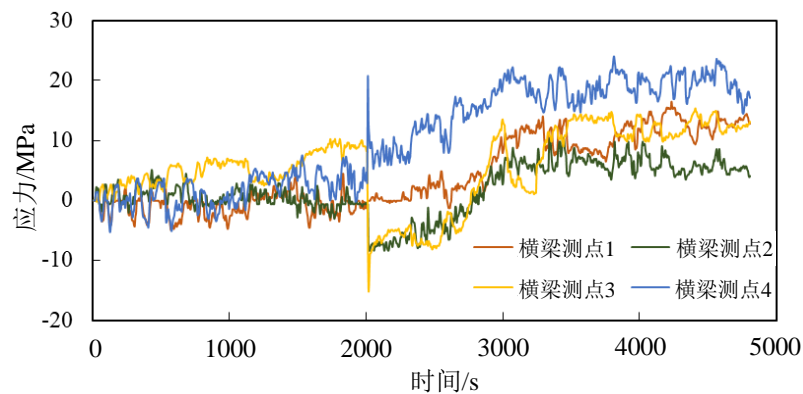


Figure 6. Stress curve of the beam on the platform

图 6. 台车上横梁应力曲线图

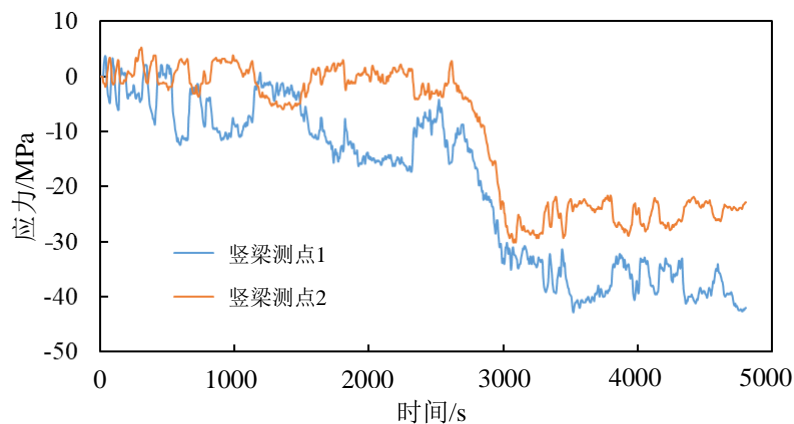


Figure 7. Stress curve of vertical beam of trolley

图 7. 台车竖梁应力曲线图

图 8 是台车底大梁跨中及悬臂处的应力变化。其中，测点 1 是底梁跨中位置应力变化情况，测点 2 是悬臂位置应力变化情况。由图可知，在混凝土浇筑过程中，底梁跨中位置应力在 0~10 MPa 之间波动，跨中位置应力在 0~30 MPa 范围内波动，均满足设计要求。通过以上分析可知，在地下管廊混凝土浇筑过

程中,台车框架(包括上横梁、竖梁和底梁)各位置处的实际受力情况均小于结构自身承载力,因此台车框架结构处于稳定状态。

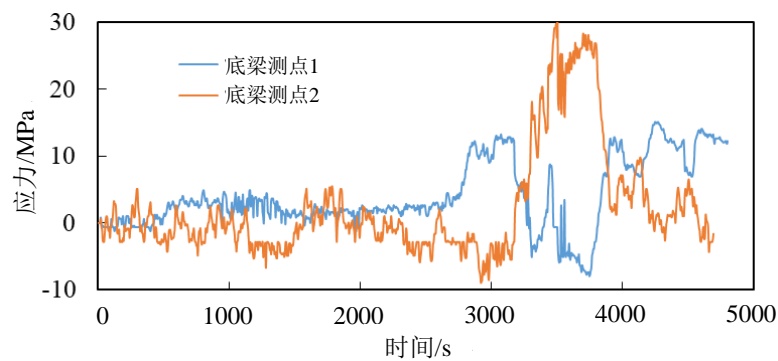


Figure 8. Stress curve of the floor beam of trolley

图 8. 台车底大梁应力曲线图

3.2. 内外模板受力分析

内外模板在浇筑过程中所受应力如图 9 和图 10 所示。其中,内模板 2 个测点分布在下侧加强横背楞靠上同一高度处的相邻位置。结果表明,开始混凝土后,内模板应力随时间迅速增加,在大约 10 min 后应力逐渐稳定,不再随时间明显增加,最大应力在 20 MPa 附近。

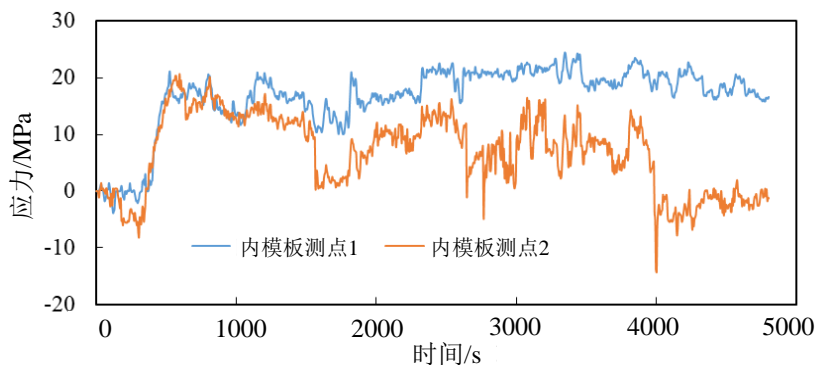


Figure 9. Stress curve of the internal formwork

图 9. 内模板应力曲线图

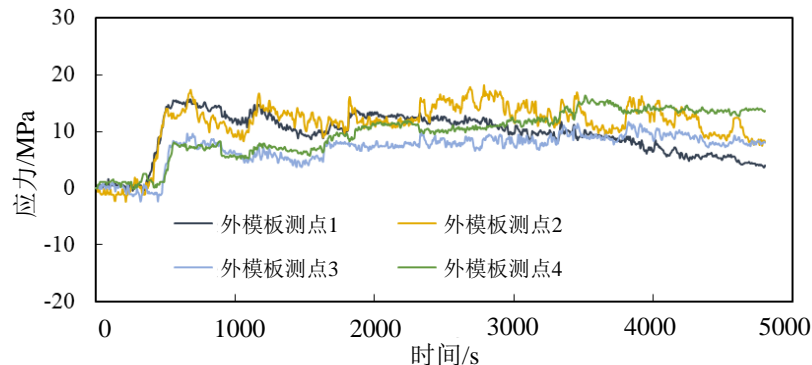


Figure 10. Stress curve of the external formwork

图 10. 外模板应力曲线图

外模板共设置 4 个应力测点, 2 个位于上侧加强横背楞靠下位置, 另外 2 个位于上侧加强横背楞靠上位置。测试结果表明, 外模板 4 个测点处应力均在开始浇筑混凝土后迅速上升, 然后逐渐稳定; 4 个测点处的应力均不超过 20 MPa, 最大应力在 17 MPa 左右, 外模板应力明显小于内模板应力。此外, 在混凝土浇筑初期, 横背楞靠下测点处的应力明显大于靠上测点处的应力, 在混凝土浇筑中后期, 上下测点处的应力没有明显区别。总体来说, 内外模板受力稳定, 且整体处于较低水平, 模板设计满足其受力要求。

3.3. 内外模板加强横背楞受力分析

内模板加强横背楞测点共 2 个, 均位于下侧加强横背楞处, 其应力曲线如图 11 所示。从图中可以看出, 从混凝土浇筑开始, 内模板加强横背楞应力随着测试时间的增加而缓慢增加, 60 min 后混凝土浇筑结束, 此后应力逐渐趋于稳定, 基本在 40~50 MPa 范围内波动。值得说明的是, 混凝土浇筑完成后, 加强横背楞测点 1 处应力曾增加至 70~80 MPa 附近, 持续时间约 10 min, 然后又恢复至 40~50 MPa, 这可能与试验过程中人为因素造成的扰动有关。

外模板加强横背楞共设置 2 个测点, 分别位于上侧和下侧横背楞处, 如图 12 所示。在混凝土开始浇筑后的 500 s 内, 外模板加强横背楞应力急速上升至 25 MPa 附近, 随后保持保持稳定, 直到浇筑结束(3500 s)。后期, 下侧横背楞测点处应力又增至 35 MPa 附近, 上侧横背楞测点处应力无明显增加。外模板加强横背楞应力明显小于内模板横背楞, 内外模板横背楞实际受力均明显小于设计值, 满足要求。

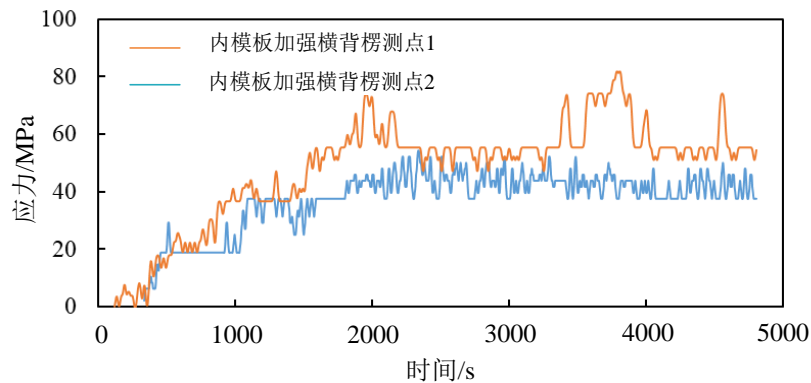


Figure 11. Stress curve of stiffening cross back at internal formwork

图 11. 内模板加强横背楞应力曲线图

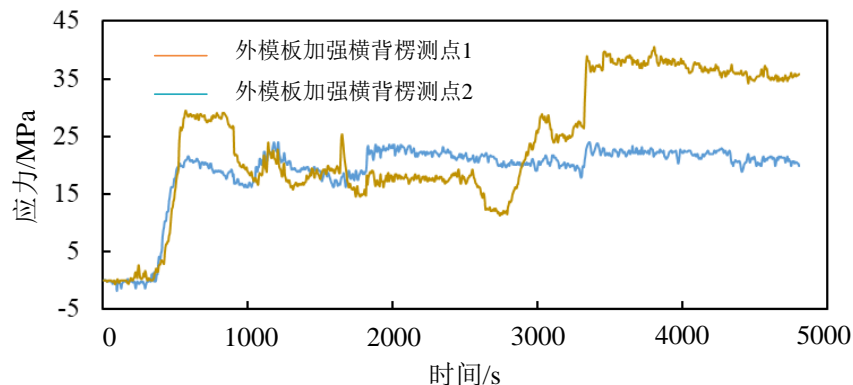


Figure 12. Stress curve of stiffening cross back at external formwork

图 12. 外模板加强横背楞应力曲线图

3.4. 外模板对拉螺栓受力分析

外模板对拉螺栓应力如图 13 所示, 其中测点 1、4 位于上侧加强横背楞对拉螺栓, 2、3 位于下侧加强横背楞对拉螺栓。结果表明, 对拉螺栓应力随着时间逐渐增加, 在混凝土开始浇筑 10 min 内增长迅速, 然后呈缓慢增长趋势。在测试过程中, 各测点应力曲线发生了明显波动, 可能是由于在混凝土浇筑过程中, 重量增加对拉螺栓发生了轻微的震荡。对拉螺栓最大应力接近 300 MPa, 出现在测点 4, 其余测点最大应力在 250 MPa 左右。因此, 混凝土浇筑过程中, 对拉螺栓受力较大, 最大可达 250~300 MPa, 这比对拉螺栓所用材料 Q235 的屈服强度(235 MPa)更大。因此, 建议采用较大强度的金属合金对拉螺栓或者增加对拉螺栓的直径。

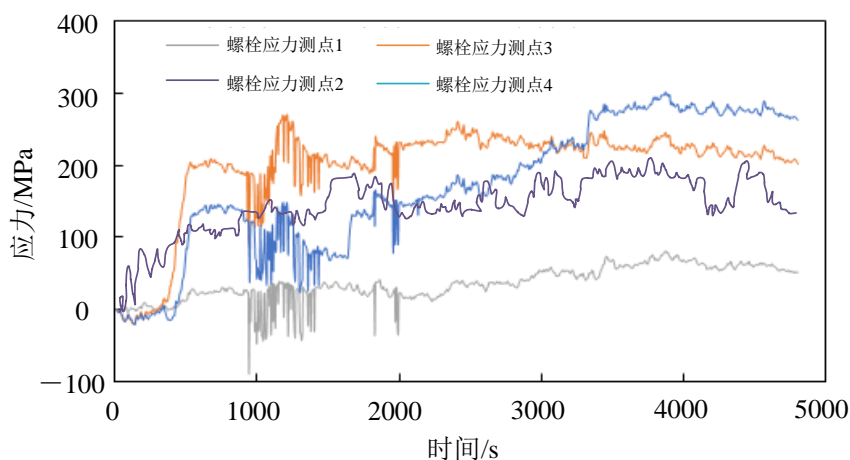


Figure 13. Stress curve of tension control bolt
图 13. 对拉螺栓应力曲线图

4. 工程应用分析



Figure 14. Engineering test of working performance of hydraulic formwork trolley
图 14. 液压模板台车工作性能的工程试验

为明确液压模板台车在管廊建设中的适用性, 开展了液压模板台车工程试验, 如图 14 所示。A 图为液压模板台车通过轨道运行至指定位置, B 图为内外模板的支护, C 图为混凝土浇筑过程, D 图为混凝土

土浇筑完成后脱模后的实际效果图。由图可知, 液压模板台车可以完成管廊的建造, 建造过程中台车、内外模板、加强横背楞和对拉螺栓工作性能良好。需要特别说明的是, 此处外模板的对拉螺栓仍旧采用 Q235 钢制成, 虽然工程试验达到了预期效果, 但是为保证外模板的工作性能和施工过程的安全, 建议在工程建造过程中将对拉螺栓进行强度升级。

5. 结论

通过开展液压模板台车工程性能测试和工程应用试验, 对管廊施工过程中台车关键节点的受力特征进行分析, 得出以下结论和建议:

(1) 混凝土浇筑过程中, 直径 18 mm 的对拉螺栓最大应力约 300 MPa, 超过了 Q235 钢材的屈服强度, 建议采用高强度合金材料或增加对拉螺栓的直径, 保障台车在使用过程中的安全性和稳定性;

(2) 内外模板最大应力在 20 MPa 左右, 外模板应力明显小于内模板, 内外模板加强横背楞最大应力在 40~50 MPa 之间, 均处于较低应力水平, 模板和加强横背楞满足受力要求;

(3) 台车上横梁和底梁最大应力小于 30 MPa, 竖梁受力不超过 50 MPa, 在混凝土浇筑过程中和浇筑完成后, 台车框架始终处于稳定状态, 同时考虑到既有结构受力远小于材料可承受值, 必要时可考虑精简台车构造。

基金项目

四川省科技成果转移转化示范项目: 城市地下综合管廊施工全自动液压模板台车成套设备的研发及应用(2020ZHCG0028)。

参考文献

- [1] 杜宇. 民生优先安全为重——解读《国务院关于加强城市基础设施建设的意见》[J]. 中国勘察设计, 2013(10): 2.
- [2] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加强城市地下管线建设管理的指导意见[J]. 建筑监督检测与造价, 2014(4): 6-10.
- [3] 住房和城乡建设部 能源局推进电力管线纳入城市地下综合管廊的意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2016(30): 53-55.
- [4] 国务院. 国务院关于印发扎实稳住经济一揽子政策措施的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/31/content_5693159.htm, 2022-05-31.
- [5] 住房和城乡建设部, 国家发展改革委. “十四五”全国城市基础设施建设规划的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/31/content_5703690.htm, 2022-07-07.
- [6] 林金扬. 现浇与预制城市综合管廊的综合对比研究[J]. 低碳世界, 2021, 11(11): 71-72.
- [7] 李豪. 城市地下综合管廊现浇施工技术[J]. 建筑与装饰, 2023(3): 175-177.
- [8] 吴同昌, 李昌泽, 何震华. 铝合金模板在现浇地下综合管廊结构施工中的应用[J]. 施工技术, 2017, 46(8): 3.
- [9] 石立国, 张耀, 李海龙, 等. 上下分体装配式预制管廊施工技术[J]. 施工技术, 2017, 46(21): 5.
- [10] 戴磊, 滕岩, 王艳艳, 等. 预制城市综合管廊的关键技术研究[J]. 建筑技术, 2017, 48(10): 4.
- [11] 孙文昊, 张美聪, 刘浩, 等. 现浇与预制相结合的综合管廊结构及其施工方法: CN201611257846.9 [P]. 2019-02-26.
- [12] 李祝龙, 刘百来, 李自武. 钢波纹管涵洞力学性能现场试验研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 79-82.
- [13] 王金国, 程涛. 地下预制综合管廊的发展现状介绍及实践研究[J]. 住宅产业, 2018(8): 2.
- [14] 郭文新, 孟晓宏, 胡伟山, 等. 综合管廊施工用液压模板台车工程测试及分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2021(5): 2075.