

预制装配式管廊受力性能试验研究

顾卫兵¹,冯宇韬²,刘江涛¹,李维滨²,王昊¹

(1. 南京电力设计研究院有限公司, 江苏 南京 210039; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:以实际工程为背景,为比较预制装配式管廊和现浇管廊的力学性能差异,制作了普通管廊和采用预应力连接的预制装配式管廊足尺模型。根据管廊所受实际荷载采用静力试验方法研究装配式综合管廊和普通管廊的力学性能。探究加腋预应力钢棒连接下管廊和普通管廊的裂缝开展,破坏机制以及钢筋应力等力学性能,以验证预制装配式设计的可行性。结果表明:两试件在荷载作用下裂缝发展均表现为顶板跨中弯压为主,装配式试件破坏荷载较普通试件小14%;加腋区的存在减小顶板净跨,进而减小顶板竖向挠度。

关键词:装配式综合管廊;预应力连接;足尺试验;力学性能

中图分类号: TU990.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)01-0091-07

Experimental Research on Mechanical Performance of Prefabricated Utility Tunnel

GU Weibing¹, FENG Yutao², LIU Jiangtao¹, LI Weibin², WANG Hao¹

(1. Nanjing Electric Power Design Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210039, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: In order to compare the mechanical properties of prefabricated utility tunnel and cast-in-place utility tunnel, the full-size models of prefabricated utility tunnel with prestressed connection and the ordinary were developed base on a practical project. According to the actual load of the engineering, the mechanical properties of the prefabricated utility tunnel and ordinary utility tunnel were analyzed by the static test method. In order to verify the feasibility of prefabricated assembly design, the crack development, failure mechanism and reinforcement stress of the lower pipe corridor connected with axle-type prestressed steel bar and the ordinary were investigated. The results showed that the crack development of the two specimens under the action of load was mainly the roof span bending pressure, and the failure load of the prefabricated specimens was 14% smaller than that of the ordinary specimens. In addition, the net span of the roof is reduced and the vertical deflection of the roof is reduced by the axillary angle.

Keywords: prefabricated utility tunnel; prestressed connection; full-scale model experiment; mechanical performance keywords:

城市建设的未来趋势是开发地下空间^[1],综合管廊(utility tunnel)是地下空间开发的主要方向^[2-3]。在地下结构中,采用预制装配式施工可以有效减少工期,是未来发展的方向^[4]。目前常见的预制装配式结构连接方式有:预应力钢绞线连接和预应力钢棒连接^[5]。管廊结构常见的连接构造是设置加腋区,在加腋区预留孔洞;构件运送到现场之

后吊装安装到位后进行预应力张拉连接。

油新华等^[6]和薛伟辰等^[7]采用足尺试验研究了综合管廊的受力特点和破坏形式。李荣华等^[8]和王述红等^[9]采用有限元研究了埋深对矩形管廊受力性能的影响。易伟建等^[10]、彭真等^[11-12]采用试验结合有限元模拟的方式研究了双仓无腋角管廊的受力特性。目前研究中较少考虑加腋区域对管廊

力学性能的影响,对钢棒连接的研究比较少^[13]。本文基于前人的研究和实际工程需要,采用静力加载试验对钢棒连接的加腋矩形管廊和普通管廊足尺模型的力学性能进行了比较研究。

1 试验概况

1.1 试件制作

本试验的试件 1(见图 1)为两段预制装配式钢筋混凝土管廊节段,每段长 0.5 m,宽 2.9 m,高 2.45 m;试件 2 为一段整体管廊,长 1.0 m,宽 2.9 m,高 2.45 m。试件顶板和侧壁板厚为 250 mm,底板厚度为 300 mm。通道迎土面混凝土保护层厚度为 50 mm,内部保护层厚度为 20 mm。在试件 1 四角设置直角三角形加腋区,直角边边长为 250 mm;在加腋区预留有 pc 钢棒连接孔道,孔道直径为 20 mm,孔道中心距两侧内壁各 40 mm。

试件采用强度等级为 C40 的商用混凝土,钢筋采用 HRB400 级带肋钢筋,预应力钢棒采用直径为 16 mm 的 35CrMo 钢棒^[14]。

1.2 加载程序

本工程位于南京地区,参照《城市综合管廊工程技术规范》^[15](GB 50838—2012)的相关规定,结构重要性系数为 1.1,裂缝控制等级为三级,且不能出现宽度大于 0.2 mm 的贯通裂缝,防水等级为二级,基础设计等级为乙级,管廊结构环境类别为二 b。按照《建筑抗震设计规范》^[16](GB 50011—2010),该工程为重点设防类工程,场地类别为 II

类,抗震设防烈度为 7 度,抗震等级为三级,设计基本地震加速度为 0.1g。根据设计资料和地勘报告,工程开挖深度为 4.5 m,施工范围内土体的物理力学指标见表 1。

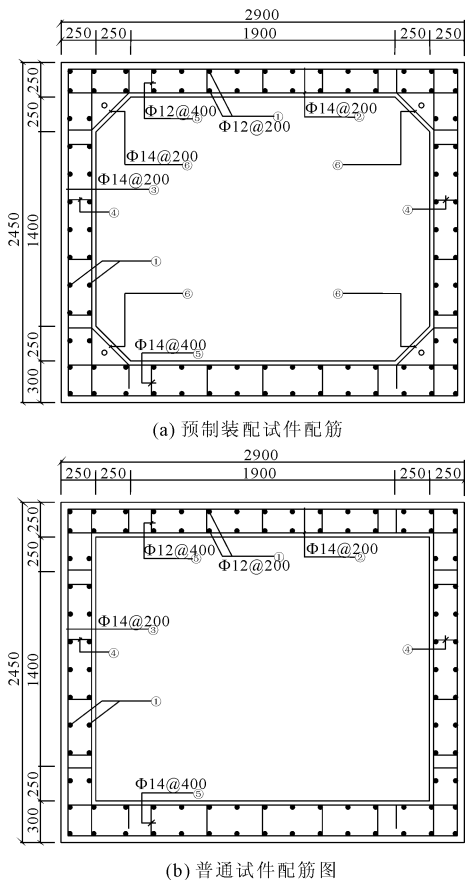


图 1 管廊试件配筋图(单位:mm)

表 1 各土层分布及主要物理力学指标

土层	岩土类别	分层厚度 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	地基系数 /(kN·m ⁻⁴)	剪切模量 /MPa
①	素填土	0.60	17.5	12	14.6	—	5.15
②-1	粉质黏土	1.50	17.8	20	17.2	8000	4.55
②-2	淤泥质粉质黏土	5.60	16.2	8	15.5	6000	3.44
②-3	粉质黏土	2.30	18.4	31	12.0	18500	4.25
③	粉质黏土	3.30	19.3	40	14.4	26000	5.04
④	含砾粉质黏土	0.50	19.6	34	23.0	—	5.60

工程中,开挖深度为 4.5 m,地基处理时素混凝土垫层厚度为 0.15 m,管廊高度为 2.45 m,所以管廊上覆土层厚度为 1.9 m。计算可得管廊顶板所受上覆土荷载为 107.31 kN。

由于管廊多修建于城市道路下方,车辆荷载按城-A 级^[12]取值,车辆总重为 700 kN,其平面、立面布置见图 2。在计算时车辆荷载简化为均布荷载,分布宽度为两个车轮之间的宽度即 1.8 m。

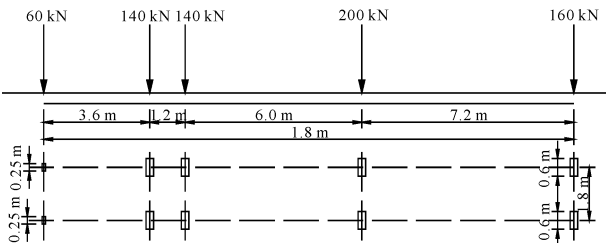


图 2 城-A 级车辆荷载布置图

当车辆荷载在土体中传递时,会按照一定的扩散角度传递并认为同一深度的附加荷载均匀分布,《建筑地基处理技术规范》^[17](JGJ 79—2012)中提出在设计阶段土体的扩散角可取 35°,规范^[15]对于管廊上方道路车辆荷载标准没有做明确的规定;由于管廊节段长度较短,车辆经过时最多只有一组轮胎位于管廊上方,因此车辆荷载 Q 按城-A 级^[18]中最不利的情况取 200 kN。取管廊标准节段长度 1.1 m, b 按规范^[18]中车辆荷载布置图中左右轮胎间距取 1.8 m。由此计算可得顶板所受车辆荷载附加应力 39.08 kN。

在管廊结构设计时,应考虑恒载与活载的荷载组合,并采用含分项系数的设计表达式进行设计。对永久荷载效应控制的组合,永久恒载的分项系数取 1.3,而汽车荷载等活载的分项系数取 1.5。由此得,管廊顶板所承受的荷载设计值为 198.12 kN。综上,车辆和上覆土层在管廊顶部产生的荷载设计值为 198.12 kN,在静力试验时荷载取为 200 kN(见表 2)。

表 2 综合管廊所受荷载统计

跨度 /m	进深 /m	受荷 面积 /m ²	恒载 标准值 /kN	活载 标准值 /kN	所受荷载 标准值 /kN	所受荷载 设计值 /kN
2.9	1	2.9	107.31	39.08	146.39	198.12

预应力钢棒采用扭力扳手施加预应力,初始预应力大小为 348 MPa,对应每根钢棒初始张拉力为 70 kN。预应力钢棒材性性能见表 3。

表 3 预应力钢棒力学性能

钢棒直径 /mm	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 /%	弹性模量 / $\times 10^5$ MPa
16	921	1025	15	2.10

本试验为破坏试验,试验加载分为预加载、正式加载、破坏加载三个阶段^[19]。预加载阶段施加最大荷载为标准荷载的 34%,即 50 kN;正式加载阶段施加到结构所受标准荷载,采用分级加载制度,每级加载标准荷载的 20%,即 30 kN,分 5 级加载至荷载标准值,加载过程每级荷载持荷载 96 min,达到标准荷载后持荷 144 min;破坏加载阶段先按照正式加载梯级加载至标准荷载,随后按照设计值 10%,即 20 kN 进行分级加载,加载至设计值 200 kN 时持荷 30 min,其余每级持荷 20 min。加载过程如图 3 所示。

1.3 支座及加载装置布置

实际工作中综合管廊所受荷载应为均布面荷

载,本试验为研究 pc 钢棒连接的预制装配式管廊与普通管廊在工作荷载作用下的受力情况,以验证 pc 钢棒用于综合管廊连接的可靠性^[14]。支座布置如图 4 所示。荷载通过分配梁进行传递,分配梁布置见图 4。

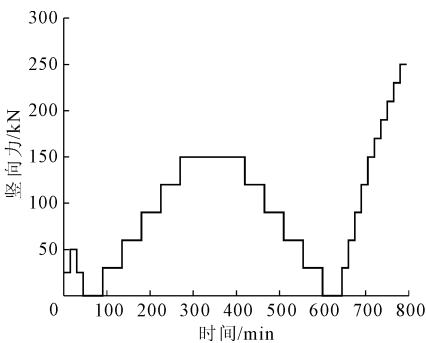


图 3 分级加载荷载

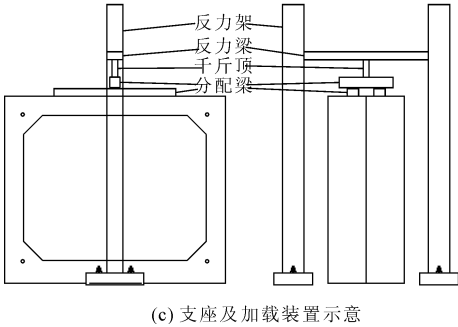
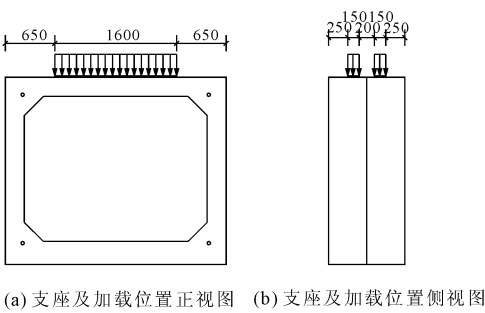


图 4 支座及加载布置(单位:mm)

1.4 测量内容

(1)应变、挠度测量。应变的测量通过粘贴应变片实现,主要测量关键位置的钢筋和混凝土的应变,位置根据综合管廊的最不利受力工况和有限元模型计算结果确定^[9]。混凝土上的应变片粘贴于综合管廊顶板跨中和顶板角部加腋区域,主要采集受拉区混凝土开裂情况;钢筋上的应变片在混凝土浇筑前粘贴^[20],用量测综合管廊顶板跨中弯矩最大处以及上部角点区域负弯矩最大处的钢筋应变;在连接所用的预应力钢棒上粘贴应变片,用以测量受荷过程中的预应力损失。在综合管廊顶板和侧壁

共设置 6 个测点,钢筋骨架布置 8 个测点,预应力钢棒布置 8 个测点,应变片粘贴位置如图 5 所示。

挠度测量采用量程为 ± 25 mm 的位移计,在顶板跨中、加腋部位以及侧壁中点共布置 3 个,布置位置如图 5 所示。

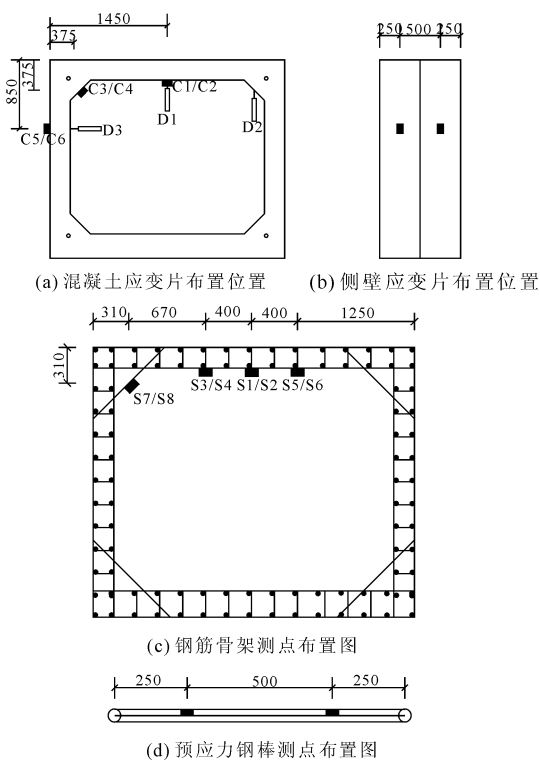


图 5 应变片位移计布置位置(单位:mm)

(2) 裂缝观测。试验前利用白色乳胶漆将顶板及侧壁内外侧刷白,并弹上边长为 100 mm 的正方形网格,当裂缝出现后及时沿着裂缝做标记,记录下裂缝的位置、走向等并利用标准点规估测裂缝宽度。

试验中位移、应变以及荷载的数据采集采用江苏泰斯特电子公司生产的 TST3826F-L 静态应变测试分析系统,通过数据线与电脑链接,实时对数据进行传输和存储,为了保证数据的准确性和连续性,在数据采集时设置为定时自动采集。

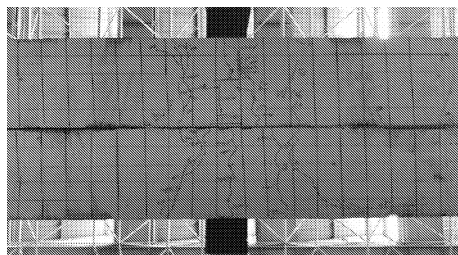
2 试验结果及分析

2.1 裂缝分布情况

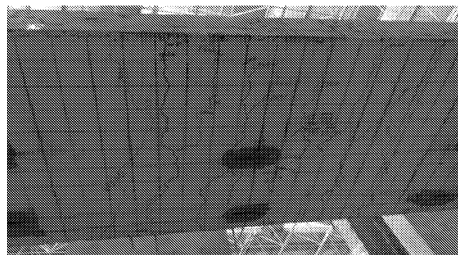
对装配式试件,在预加载和正式加载前四阶段未出现可见裂纹,正式加载第五加载步即荷载 150 kN 时,试件顶板跨中部内侧受压侧出现裂缝;随荷载增大,裂缝沿纵向扩展,且跨中两侧对称出现新裂缝。当荷载增大到 200 kN 时,顶板正中裂缝连通,顶板两侧两条对称裂缝继续扩展。荷载从 200 kN 增至 300 kN 时,两侧对称裂缝逐渐连通,裂缝高度

向受压区快速扩展,侧壁出现明显裂缝且快速发展。荷载为 230 kN 时侧壁裂缝连通,荷载为 300 kN 时,侧壁裂缝贯穿,延展到加腋区,顶板裂缝最大宽度为 0.6 mm,超过规范限制,且发展至受压区,认为试件破坏。综上,裂缝从顶板跨中出现向纵向发展,加腋区端部存在较多侧壁裂缝,试件破坏过程中,顶板受拉区混凝土开裂,裂缝充分发展;随着荷载施加,受拉区钢筋出现屈服现象,受压区混凝土被压碎。如图 6(a)所示。

对于普通管廊试件,裂纹在第五加载步及 150 kN 时观察到裂纹,裂纹在顶板底面跨中和侧壁距顶面 30 cm ~ 40 cm 的范围内出现,随着荷载增大沿纵向扩展,荷载达到 200 kN 时,顶板裂纹附近出现纵向裂缝,角点区域也出现裂纹。荷载从 200 kN 增至 300 kN 时,新裂缝大量出现,顶板跨中裂缝宽度增大且向板厚方向发展。荷载达到 350 kN 时,裂缝在加载梁之间满布,顶板在靠近角点区域以及侧壁中部、下部的区域开始出现新裂缝;顶板中部多条裂缝贯通,裂缝最大宽度达到 0.6 mm,超过规范限制,认为试件已经破坏。综上,裂缝先由顶板跨中产生向纵向发展,侧壁裂缝由上端产生,如图 6(b)所示。



(a) 预制装配式试件顶板裂缝



(b) 普通管廊顶板裂缝

图 6 顶板裂缝分布情况

对比图 6 的两图可以发现,两个试件顶板裂缝分布情况差别不大;装配式试件在试件接触面首先产生裂缝,而普通管廊则在边缘处首先产生裂缝,而装配式试件的裂缝发展更向两个侧壁方向倾斜,而普通试件的裂缝发展则较为垂直;两个试件在接近破坏时均出现了多条横向裂缝将多条裂缝贯通的情

况,同时裂缝的宽度很快变宽并向受压区发展。

图 7 为两个试件侧壁的裂缝分布情况,容易观察到普通试件的裂缝分布更为均匀,普通试件裂缝最先在靠近底板段出现,随后向上发展,并在最终破坏时出现了竖向垂直裂缝向角点区域发展;装配式试件则只出现了两条明显裂缝,其中靠顶面的一条也与普通管廊侧壁顶板裂缝发展路径类似,在贯通侧壁后向着角点区域发展。两试件出现差异的原因可能是因为装配式试件采用了加腋区构造,从而导致了荷载的集中。

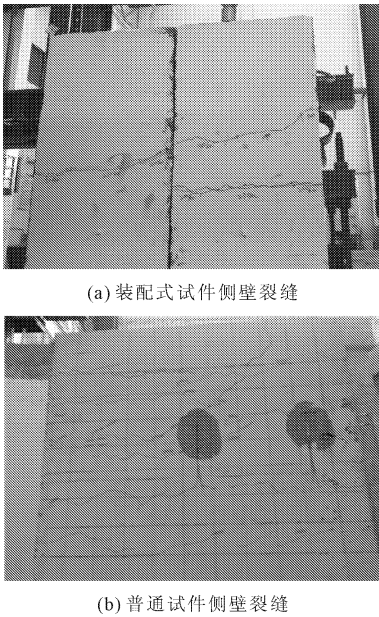


图 7 侧壁裂缝分布情况

2.2 荷载 - 位移曲线

试验时,在顶板跨中及加腋区域分别架设位移计观测顶板的挠度变化,管廊顶板荷载 - 位移曲线如图 8 所示。从图中可以看到,每一个荷载步下管廊顶板的挠度变化都比较明显。荷载较小时,挠度的增加与荷载的增加基本呈线性关系,当荷载达到 120 kN 时,普通试件的跨中挠度为 4.4 mm,装配式试件的跨中挠度为 3.1 mm,均低于规范要求的挠度限值。荷载超过 90 kN 之后顶板中部的挠度变化较大,在 150 kN 标准值时普通试件中部的挠度为 7.45 mm,装配式试件的顶板最大挠度为 5.12 mm,为净跨的 1/370,小于规范的挠度上限 1/250。两试件在角点区域的挠度均较小,普通试件为 1.05 mm 以下,装配式试件为 0.5 mm 以下。

图 9 为两个试件的侧壁中点和顶板中点荷载 - 位移曲线。可以看出在加腋情况下装配式试件侧壁中点位移大于普通试件,荷载为 150 kN 时,装配式

试件的侧壁位移为 0.27 mm,普通试件侧壁位移为 0.14 mm,装配式试件位移是普通试件的约 1.93 倍,说明加腋区的存在对侧壁受力影响显著。但同时加腋区减小了管廊顶板净跨度,实现了降低顶板跨中的最大弯矩,减小竖向挠度的目的,装配式试件的顶板挠度要小于普通现浇试件,在荷载为 150 kN 时,装配式试件顶板挠度 5.12 mm,普通试件顶板挠度为 7.45 mm,普通试件是装配式试件的 1.45 倍。最终装配式试件的破坏形式与普通试件类似,均为顶板受弯压破坏。普通试件的破坏荷载为 350 kN,大于装配式试件的 300 kN,这可能是由于普通试件没有连接削弱,整体性更好。

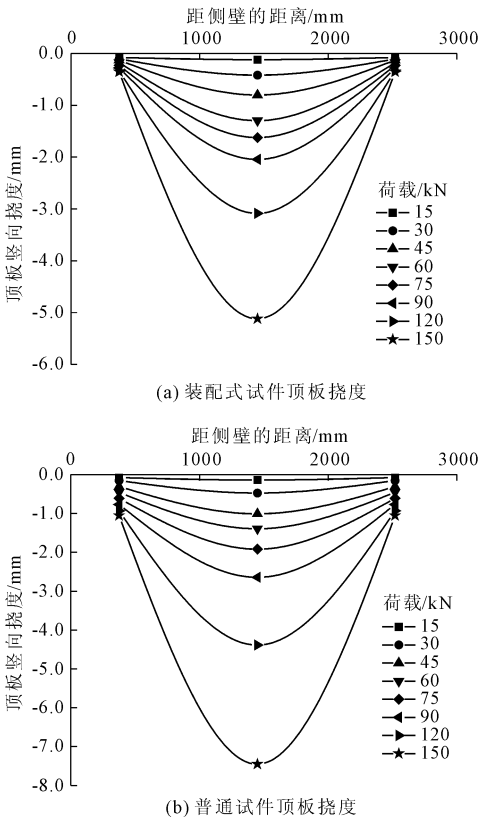


图 8 顶板挠度

2.3 钢棒钢筋应变

从图 10 中可以得出,锚固完成后钢筋的初始应变为 $1\,650\,\mu\varepsilon$,随着荷载的增大,上下部钢棒应变均出现明显下降。其中上部钢棒在荷载为 200 kN 时下降为 $1\,030\,\mu\varepsilon$,下部钢棒为 $1\,375\,\mu\varepsilon$ 。这表明装配式连接试件组合工况下钢棒的预应力折损是连接部位面临的主要问题。根据文献[14]可知,如采用 5 mm 橡胶密封垫,橡胶接触应力应当不小于 1.5 MPa 可满足抗渗要求。本次试验结果表明,在管廊本身结构发生破坏前,连接部位预紧力能保证橡胶

密封垫接触应力满足抗渗要求。

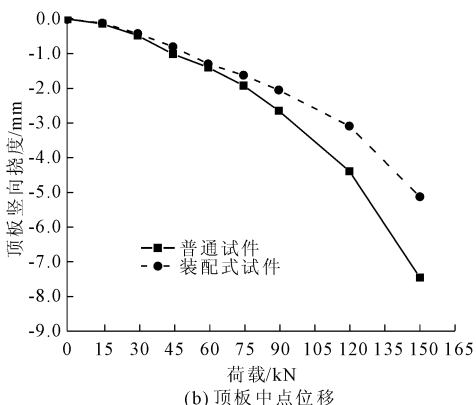
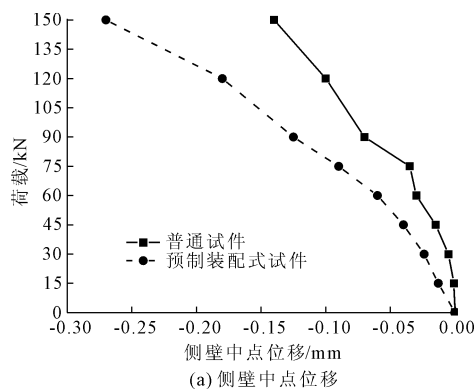


图9 侧壁及顶板中点荷载-位移曲线

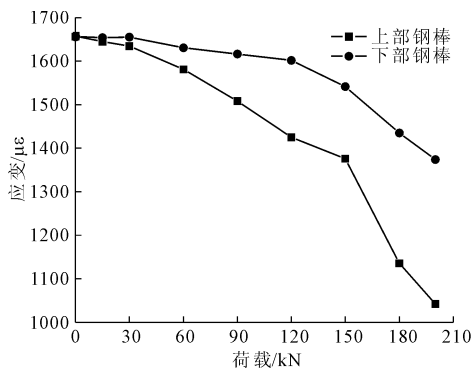


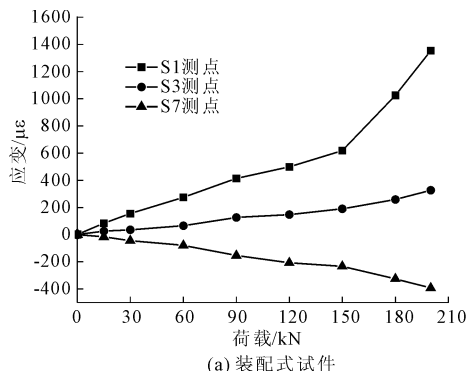
图10 钢筋应变

试件关键部位钢筋的荷载-应变曲线如图 11 所示。可以看出,从开始加载一直到 200 kN 两个管廊的钢筋都没达到屈服状态。顶板跨中的钢筋应变始终是最大的,且随着应力增大,跨中钢筋对于荷载的响应更加明显,在距跨中一定距离的 S3 测点的响应则明显较小。图 11(a)中 S7 测点数据表明加腋区钢筋受压,故加腋区在竖向荷载作用下不会出现开裂风险,但也表明加腋区确实向侧壁传递了压力。

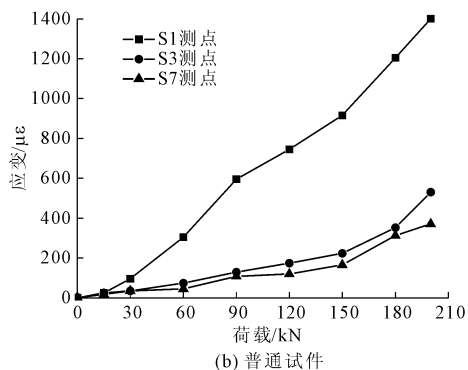
3 结 论

(1) 在荷载标准值下,两试验试件在竖向荷载

作用下裂缝发展均表现为顶板跨中的受弯压为主的特点,装配式试件破坏荷载较普通管廊小 14%,在荷载设计值下能满足规范规定的正常使用要求。



(a) 装配式试件



(b) 普通试件

图11 钢筋应变

(2) 加腋区的存在减小了管廊顶板净跨度,降低顶板跨中的最大弯矩,减小了顶板竖向挠度,但同时使得竖向荷载传递到管廊侧壁时形成集中。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 建设城市地下综合管廊, 转变城市发展方式[J]. 隧道建设, 2017, 37(6): 647-654.
- [2] 王 军, 潘 梁, 陈 光, 等. 城市地下综合管廊建设的困境与对策分析[J]. 建筑经济, 2016, 37(7): 15-18.
- [3] 张江涛, 豆红强, 王 浩. 滨海软土地区综合管廊基坑开挖钢板桩支护性状分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 120-125.
- [4] 叶林滨. 新型装配式村镇住宅混凝土结构体系综述[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 14-19.
- [5] 杨 辉, 郭正兴, 许傲逸, 等. 局部后张预应力装配式混凝土框架梁柱节点抗震试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1101-1108.
- [6] 油新华, 薛伟辰, 李术才, 等. 城市综合管廊叠合装配技术与实践[J]. 施工技术, 2017, 46(22): 68-71.
- [7] 薛伟辰, 古徐莉, 胡 翔, 等. 螺栓连接装配整体式混凝土剪力墙低周反复试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(S2): 221-226.
- [8] 李荣华, 刘伟华, 王述红, 等. 沉降及外部荷载作用下

- 益阳管廊防护效果分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017,15(4):107-111,121.
- [9] 王述红,阿力普江·杰如拉,王鹏宇,等. 预制矩形箱涵受力性能模拟及其潜在的破坏模式[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018,39(2):260-265.
- [10] 易伟建,颜良,彭真. 无腋角综合管廊结构足尺模型静载试验与有限元分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019,46(7):1-10.
- [11] 彭真. 综合管廊节段模型足尺寸试验与有限元模拟[D]. 长沙:湖南大学,2017.
- [12] 彭真,何庆锋. 综合管廊受力性能足尺试验[J]. 中国科技论文,2017,12(13):1445-1451.
- [13] 马姣蓉. 预制拼装综合管廊接头剪切试验[J]. 中国市政工程,2019(2):57-61,139.
- [14] 张铨婧. PC 钢棒连接下的预制综合管廊的接头受力性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [15] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,同济大学,中国城市规划设计研究院,等. 城市综合管廊工程技术规范:GB 50838—2012[S]. 北京:中国计划出版社,2012.
- [16] 中国建筑科学研究院,中国地震局工程力学研究所,中国建筑设计研究院,等. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [17] 建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [18] 上海市市政工程设计研究总院. 城市桥梁设计规范:CJJ 11—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [19] 周明华. 土木工程结构试验与检测[M]. 南京:东南大学出版社,2013.
- [20] 田子玄. 装配叠合式混凝土地下综合管廊受力性能试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- ~~~~~

(上接第 73 页)

- [2] 万安德. 建筑工程中软土深基坑的稳定施工技术[J]. 江西建材,2014(5):121.
- [3] 柳红燕,王蒙蒙. 高层建筑深厚软土基坑支护方案设计和质量控制[J]. 科技风,2018(23):119.
- [4] 陈师演,何锦华. 双排桩支护结构在深基坑工程中的应用[J]. 建筑结构,2019,49(S1):783-785.
- [5] 冯辉,孙勇. 双排桩设计在高层建筑深基坑支护中的应用[J]. 土工基础,2017,31(5):558-562.
- [6] 刘平,杜晓方. 地面超载对双排桩基坑稳定性影响的有限元分析[J]. 中外公路,2018,38(6):14-20.
- [7] 王凤梅,张领帅. 软土基坑双排桩加固有限元计算分析[J]. 土工基础,2018,32(2):154-160.
- [8] 林鹏,王艳峰,范志雄,等. 双排桩支护结构在软土基坑工程中的应用分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(S2):331-334.
- [9] 韩树山,程月红,陈赞. 苏州地区某深基坑悬臂双排桩支护技术[J]. 施工技术,2012,41(24):22-25.
- [10] 龙丽吉,高鑫林. 双排桩结构在滩海软基中的受力特性研究[J]. 水运工程,2015(11):140-147.
- [11] 马乾天. 深基坑双排桩支护结构的计算与应用[J]. 水利水电施工,2018(5):65-68.
- [12] 李佳鑫,冯晓腊,张哲斐,等. 双排高低桩作用机理及参数影响分析[J]. 建材技术与应用,2019(4):6-11.
- [13] 张玲,朱幸仁,欧强. 考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析[J]. 水文地质工程地质,2019,46(5):72-80.
- [14] 郑轩,朱文秀,周一君. 双排桩支护结构变形规律模型试验研究[J]. 建筑结构,2018,48(S1):763-767.
- [15] 刘军,贾喜军. 基于 FLAC^{3D} 的土工格室挡墙工程性状及敏感性因素分析[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(1):212-217.