

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.06.006

榫卯-灌浆套筒混合连接装配式方墩 轴压性能研究

林上顺¹, 何乐¹, 夏樟华², 秦志清³, 张乐彤², 陈治雄⁴

(1. 福建理工大学福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福州 350118; 2. 福州大学土木工程学院, 福州 350108; 3. 福建省交通规划设计院有限公司, 福州 350004; 4. 福建省榕圣市政工程股份有限公司, 福州 350002)

摘要: 已有研究表明, 榫卯-灌浆套筒混合连接装配式方墩(简称混合连接拼装桥墩)的抗震性能接近于整体现浇桥墩。为进一步探讨混合连接拼装桥墩的轴压性能, 以钢管的长度、直径以及壁厚等为变化参数, 进行 1 个整体现浇桥墩(编号 ZT)和 4 个混合连接拼装桥墩(编号 GTA-0~GTD-0)的轴压承载力试验, 结果表明, GTA-0~GTD-0 试件的承载力比 ZT 试件提高了 10.1%~14.4%, 其延性系数均大于 ZT 试件; GTA-0~GTD-0 试件的轴压承载力随钢管直径和长度的增大而增大, 而钢管壁厚对于试件承载力的影响较小; 拼装桥墩的破坏位置随着钢管长度的增加而上移, 逐渐接近于整体现浇桥墩, 但二者的破坏模式基本相同。

关键词: 装配式; 混合接头; 轴压试验; 桥墩; 承载力

中图分类号: U433.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)06-058-10

Experimental study on axial compressive performance of assembled square pier with tenon and mortar sleeve hybrid connection

LIN Shangshun¹, HE Yue¹, XIA Zhanghua², QIN Zhiqing³, ZHANG Letong², CHEN Zhixiong⁴

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Information in Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China; 3. Fujian Transportation Planning and Design Institute, Fuzhou 350004, P. R. China; 4. Fujian Rongsheng Municipal Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350002, P. R. China)

Abstract: Existing studies have shown that the seismic performance of the mortise and grouting sleeve mixed connection assembled square pier (referred to as the mixed connection assembled pier) is close to that of the integral cast-in-place pier. In order to further explore the axial compression performance of the mixed-connected bridge piers, a series of axial compressive tests were conducted on one integral cast-in-place bridge pier (No. ZT) and four mixed connection and assembled bridge piers (No. GTA-0~GTD-0) with varying parameters such as the length, diameter and wall thickness of the steel pipes. The results show that the bearing capacity of GTA-0~GTD-0

收稿日期: 2023-12-20

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2019J01779, 2019H6020, 2020J1477); 福州市科技成果转化资助项目(2020-GX-18)。

Supported by Natural Science Foundation of Fujian Province(2019J01779, 2019H6020 and 2020J1477), and Fuzhou Scientific and Technological Achievements Transfer and Transformation Project(2020-GX-18).

作者简介: 林上顺(1972—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事预制拼装桥梁方向研究, (E-mail)578982122@qq.com。

specimens increased by 10.1% to 14.4% compared to the ZT specimens, and their ductility coefficients were all greater than that of ZT specimens. The axial compression bearing capacity of GTA-0~GTD-0 specimens increased with the diameter and length of the steel pipe, while the wall thickness of the steel pipe had a relatively minor impact on the bearing capacity. The damage position of the assembled bridge pier moves upward with the increase of the steel pipe length, gradually approaching the integral cast-in-place bridge pier, but the failure modes of the two are basically the same.

Keywords: assembled; mixed joint; axial compression test; bridge pier; bearing capacity

预制拼装桥墩已经在国内外桥梁工程中得到广泛的应用^[1-7],其拼接构造主要采用预应力筋连接、承插式连接、灌浆套筒等^[8-9]。各种连接方式都有其优势,但也存在不足之处,如预应力筋连接的造价较高且施工困难;承插式连接构造由于预制桥墩全截面插入承台,难免对承台的强度有一定的削弱;而灌浆套筒连接拼装桥墩在接头处多采用平缝,在水平荷载作用下可能出现开合或相对错动,成为整个桥墩的受力薄弱环节等。

为改善拼装桥墩在接头处的力学性能且提高拼接施工效率,欧智菁等^[10]提出了榫卯-灌浆套筒连接装配式桥墩(简称混合连接拼装桥墩),在接头处的桥墩中心位置采用CFST突榫的榫卯构造,同时在CFST突榫以外仍采用灌浆套筒进行桥墩钢筋与承台钢筋的连接,并开展混合连接拼装桥墩、灌浆套筒连接装配式桥墩和整体现浇桥墩的拟静力试验,结果表明,与传统的拼装桥墩相比,混合连接拼装桥墩的榫卯式构造能对预制桥墩进行定位和有效约束,不仅施工方便、拼装效率高,而且其抗震性能与整体现浇桥墩较为接近,优于灌浆套筒连接装配式桥墩,有一定的工程应用前景。

目前,拼装桥墩的试验大多集中在其抗震性能和节点的受力性能研究^[11-14]。关于拼装桥墩的抗压性能试验资料较为少见。桥墩作为桥梁工程的关键受力构件,其抗压性能是桥梁设计者重点关注的内容,文献[15]虽提出了采用灌浆套筒连接的拼装桥墩的受压承载力计算方法,但这种计算方法的精度仍未得到试验数据的验证。因此,需要在文献[10]所开展的拟静力试验研究基础上,进一步开展拼装桥墩的抗压性能试验。

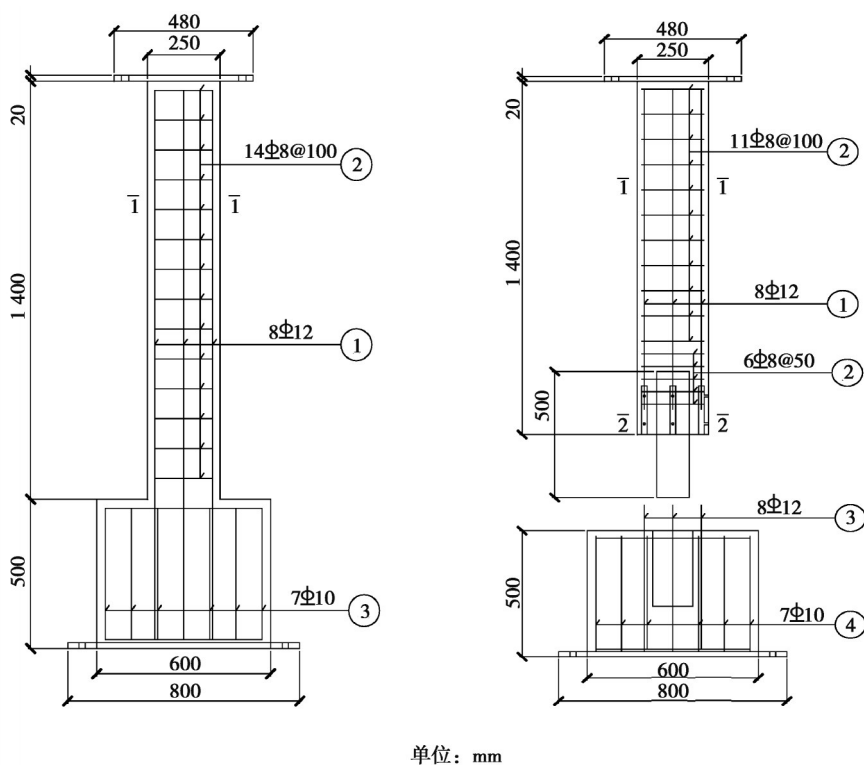
笔者拟在收集既有的拼装桥墩试验研究基础上,进一步开展采用榫卯-灌浆套筒混合连接的装配式方墩的轴压极限承载力试验,研究其在受压状态下的力学性能、损伤机理、破坏模式等,为这种采用新型接头的拼装桥墩在实际工程中的推广应用打下基础。

1 试验设计与加载装置

1.1 试件设计

以CFST突榫中的钢管长度、壁厚、直径为变化参数,设计了4根混合连接拼装桥墩试件(编号GTA-0~GTD-0),同时设计了1根整体现浇桥墩试件(编号ZT)。5个试件的截面尺寸为250 mm×250 mm,墩柱长度为1 400 mm,与试件相连的承台平面尺寸为600 mm×600 mm,厚度为500 mm。在所有试件的加载端顶面焊接平面尺寸为480 mm×376 mm,厚度为20 mm的带孔钢板,以满足压力机加载需要。CFST突榫中的无缝钢管采用Q235级钢材加工而成,编号为GTA-0的钢管长度、壁厚、直径分别为500、114、4 mm;编号为GTB-0的钢管长度、壁厚、直径分别为500、80、4 mm;编号为GTC-0的钢管长度、壁厚、直径分别为750、114、4 mm;编号为GTD-0的钢管长度、壁厚、直径分别为500、114、16 mm。

试件的混凝土采用C35商品混凝土,经实测的混凝土立方体强度为35.6 MPa,弹性模量为 0.312×10^5 MPa;纵筋采用8根直径为12 mm的HRB400热轧钢筋,经实测的屈服强度为415 MPa,极限强度为561 MPa,泊松比为0.3;箍筋采用直径为6 mm的HPB300光圆钢筋(箍筋间距200 mm),经实测的屈服强度为312 MPa,极限强度为411 MPa,泊松比为0.3。试件的尺寸及钢筋配置情况如图1所示。



单位: mm

(a) 整体现浇式桥墩

(b) 混合连接式拼装桥墩

图1 轴压桥墩试件立面图

Fig. 1 Elevation diagram of axially compressed bridge pier specimen

混合连接装配式桥墩在墩身中通过内置钢管与灌浆套筒与承台连接,试件制作严格遵循节段拼装桥墩施工流程,分别预制墩身和承台后,在试验现场拼装、灌浆。试件中的灌浆套筒采用国标Φ12型全灌浆套筒,灌浆料采用CGMJM-VI型高强灌浆料(套筒灌浆专用),各项检测项目均符合JG/T 408—2013的要求。

1.2 加载装置与测点布置

静力加载试验在福建工程学院土木工程学院结构馆进行,加载设备采用5 000 kN电液伺服压力机,如图2所示。试件采用位移加载直至桥墩试件破坏,加载速度为0.5 mm/min。在试验开始前,进行预加力、预采样,观测各项数据是否平稳,在确定各测点正常的情况下开始读取数据并记录。

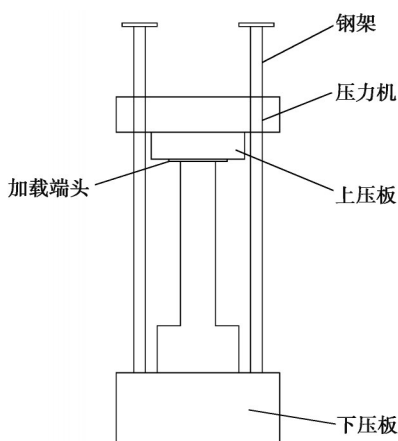


图2 桥墩试件试验装置图

Fig. 2 Diagram of the test device of the bridge pier specimen

位移计布置如图3所示,在试件的E侧与W侧,分别沿垂直墩柱高度方向1/4、1/2、3/4处各布置1个位移计,用于测量桥墩破坏位置的侧向位移。混凝土应变片沿着墩身高度35、70、105 cm布置,箍筋、纵筋应变片同样沿着墩身高度35、70、105 cm各环向布置4个应变片,钢管应变片提前布置在顶部和底部。

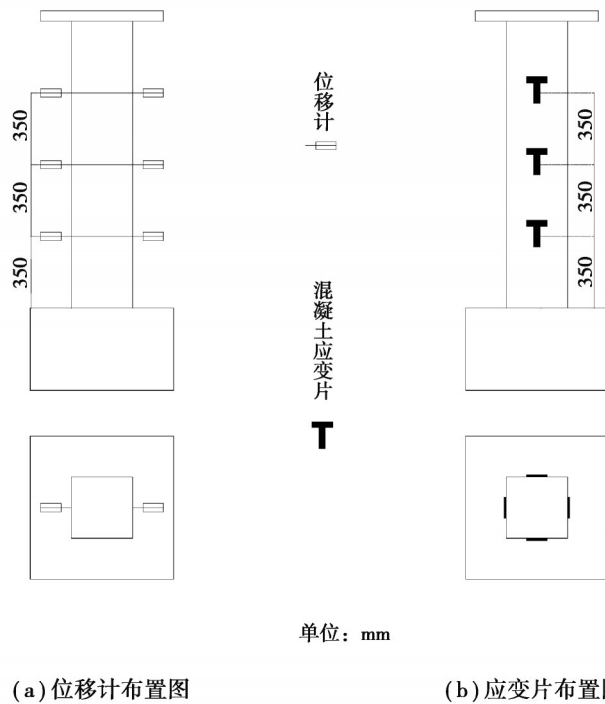


图3 应变片和位移计布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the layout of strain gauges and displacement gauges

2 试验现象与试验结果

2.1 破坏过程及破坏形态

ZT(整体现浇)桥墩轴压试件的破坏模式基本符合普通钢筋混凝土短柱的破坏模式。在荷载加载至1 654 kN之前(见图4(a)),混凝土和钢筋的应变随荷载的增大呈线性增长,试件的侧向位移较小,在桥墩上下两端边角处开始出现微小的裂缝;随着荷载的进一步增大,桥墩混凝土逐渐进入塑性状态,在距离桥墩顶部1/4墩高位置的混凝土表面开始出现裂缝,第1条裂缝的长度为12 cm,宽度为0.02 mm,当荷载接近于2 000 kN时,裂缝数量逐渐增多且长度较短,最大宽度为0.10 mm;随后荷载继续增大,当施加的荷载接近极限荷载2 222.8 kN时(见图4(b)),距离桥墩顶部1/4墩高位置出现较多不规则的网状裂纹,且裂缝逐渐扩展,最长可达到1/3柱长,最大缝宽达到1.0 mm,该区域的混凝土开始脱落,随后荷载开始下降,试件发出劈裂声,由于桥墩压缩变形增大,侧向变形也明显变大(见图4(c)),试件表现为轴压破坏,达到最大承载力,该试件的最终裂缝位置如图4(d)所示。

GTA-0、GTB-0、和GTD-0 3个墩柱试件的裂缝分布位置比较接近,位于灌浆套筒连接处以上15 cm。以下介绍GTB-0试件的破坏过程。当荷载尚未达到1 524 kN时(见图5(a)),试件混凝土和钢筋的应变基本上随荷载的增大呈线性增长,在桥墩上下两端边角处出现微小的裂缝;随着荷载逐渐增大,试件中部附近的混凝土进入塑性阶段,当荷载达到2 100 kN时,出现第1条裂缝,长度为10 cm,宽度为0.019 mm;当施加的荷载接近于极限荷载2 178.4 kN时(见图5(b)),桥墩中部开始出现网状裂纹,且桥墩中下部表面的裂缝慢慢扩展,最长达1/3柱长,最大缝宽达1.0 mm,从而造成该区域的混凝土开始脱落,应变片开始溢出,试件发出劈裂声。由于桥墩压缩变形增大,侧向变形也明显变大(见图5(c)),试件表现为轴压破坏且达到最大承载力,最终裂缝位置如图5(d)所示。

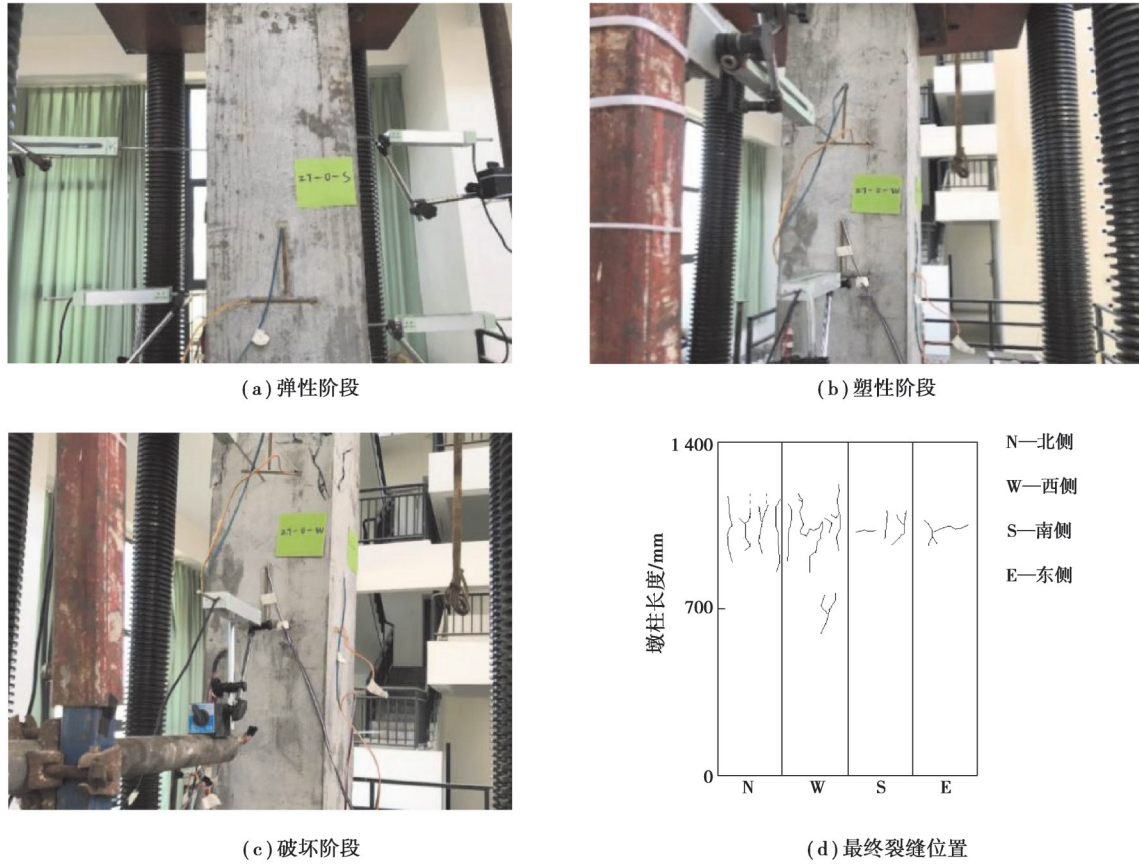


图4 试件ZT破坏现象和最终裂缝位置

Fig. 4 ZT failure phenomenon and final crack position of specimen

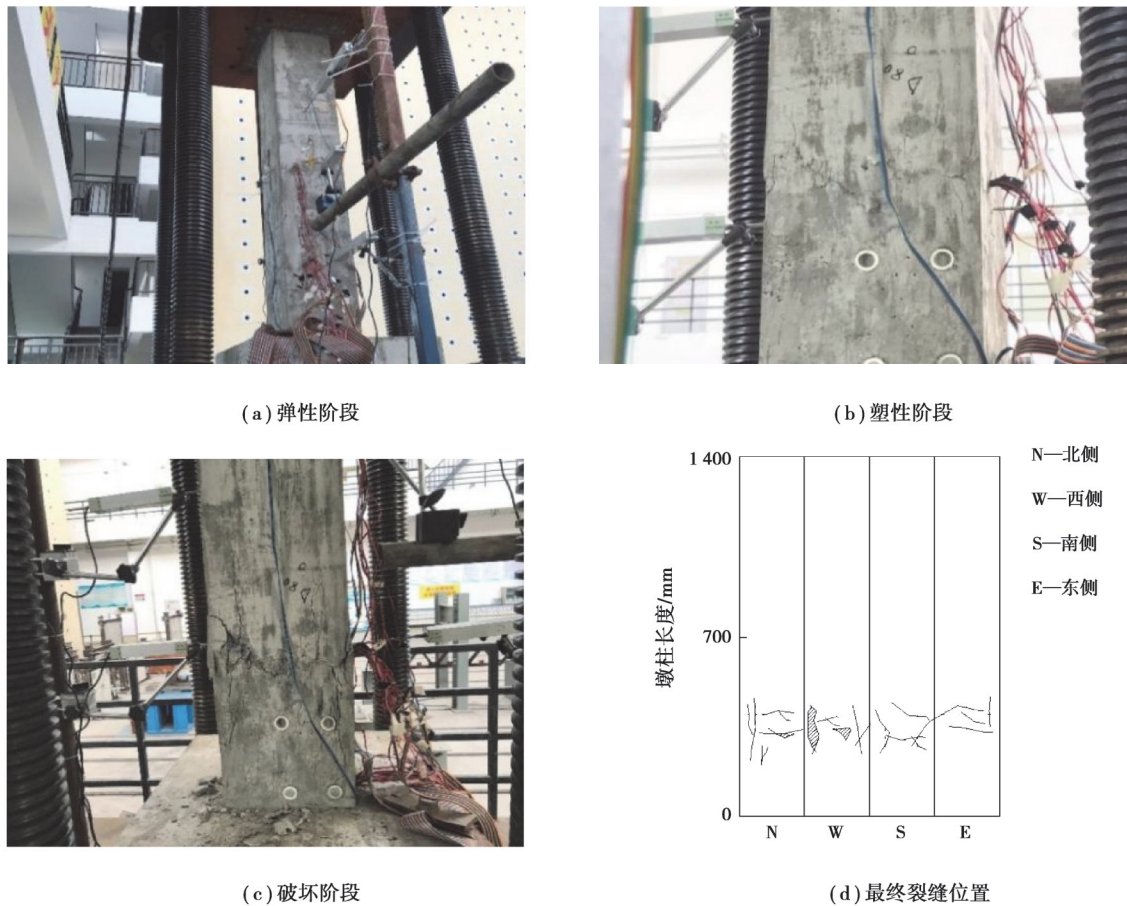


图5 试件GTB-0破坏现象和最终裂缝位置

Fig. 5 GTB-0 failure phenomenon and final crack position of specimen

相对于另外3个节段拼装桥墩试件,GTC-0试件的破坏形态略有不同,其最终破坏位置集中于墩柱中部即1/2墩高处;在施加的荷载达到1780 kN之前(见图6(a)),试件混凝土与钢筋的应变基本上随荷载的增大而呈线性增长,仅在桥墩上下两端边角处出现微小的裂缝;随着荷载的上升,桥墩中下部的混凝土进入了塑性阶段,当施加的荷载上升至2500 kN,出现了第1条裂缝,长度为14 cm,宽度为0.02 mm;当试件受到的荷载接近极限荷载2542.9 kN时(见图6(b)),桥墩中部开始出现不规则网状裂纹且桥墩中部的裂缝慢慢扩展,最长达1/3柱长,最大缝宽达1.5 mm,导致柱中区域混凝土开始脱落,混凝土应变片开始溢出,桥墩试件发出劈裂声。由于桥墩压缩变形增大,侧向变形也明显变大(见图6(c)),试件表现为轴压破坏并达到最大承载力,最终裂缝位置如图6(d)所示。

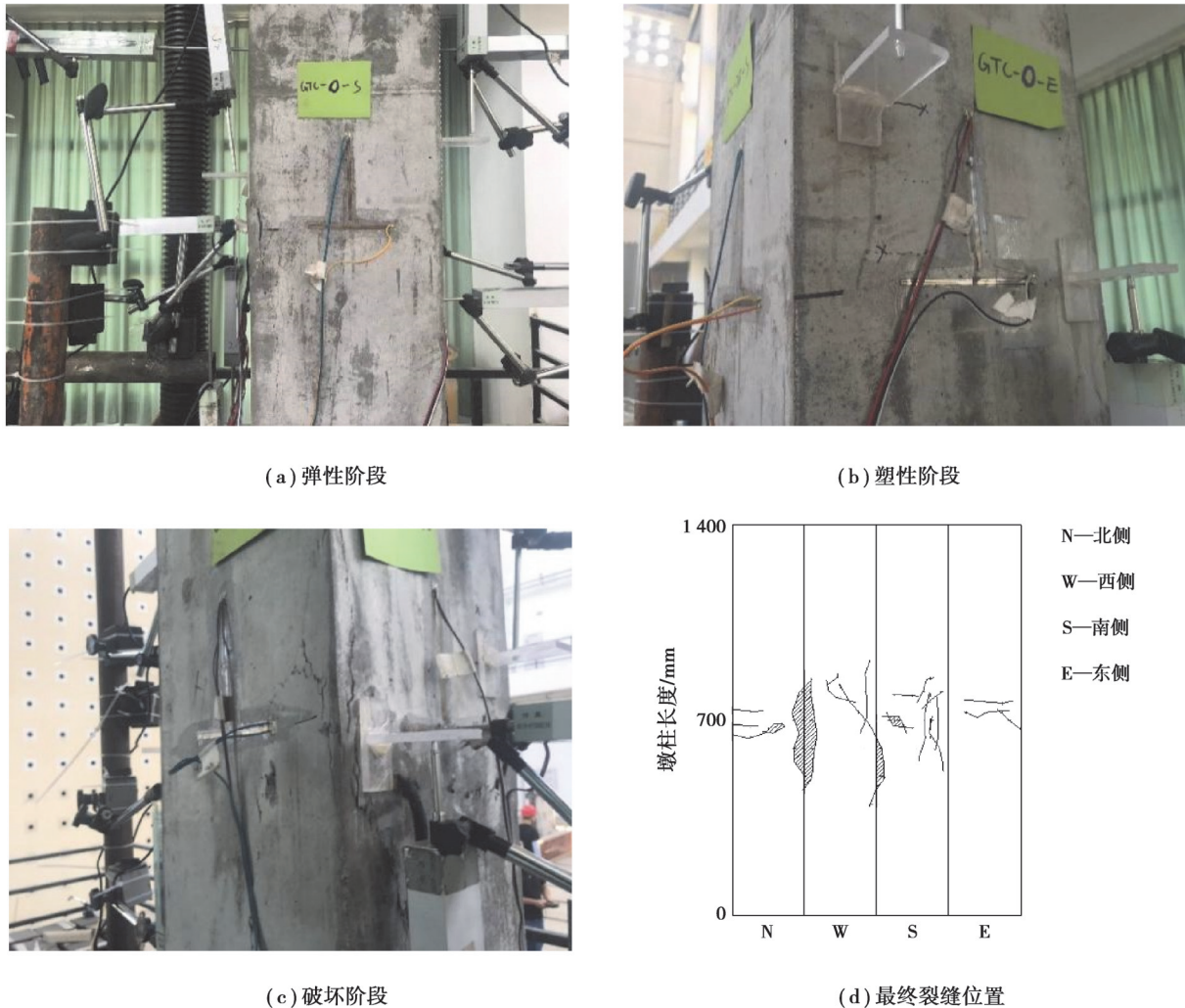


图6 试件GTC-0破坏现象和最终裂缝位置

Fig. 6 The failure phenomenon and final crack position of GTC-0 specimen

2.2 荷载-轴向位移曲线

基于各试件试验结果绘制了荷载-轴向位移曲线,如图7所示。在加载初期可以发现,整体现浇桥墩试件与节段拼装桥墩试件的混凝土应变与荷载的关系基本符合线性关系,此时试件处于弹性阶段。在试件达到极限承载力的80%时,荷载-轴向位移曲线放缓,此时各构件处于弹塑性阶段。当各试件分别达到峰值荷载时,由于混凝土逐渐被压碎且有小块混凝土开始脱落,承载力也随之迅速降低,可以看出,内置钢管直径和长度的增大对试件的极限承载力有明显提高,这是由于连接处钢管与混凝土的接触面积增大,钢管与混凝土之间能够更有效地协同工作,从而提高了接头强度;另外可以发现,在内置钢管直径和长度相同的情况下,钢管壁厚的增大对试件轴压性能的影响并不明显。

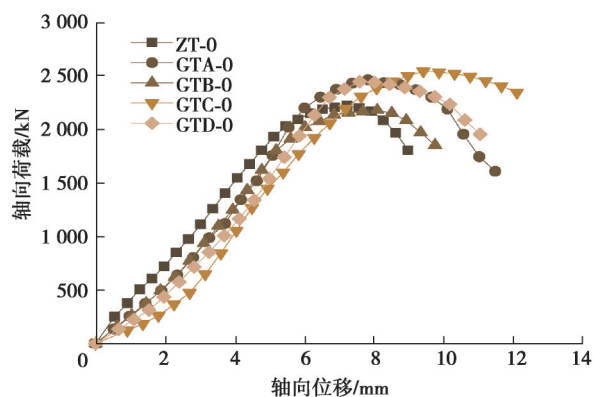


图7 轴压试件荷载位移曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-displacement curves of axial compression specimens

2.3 荷载-钢管应变曲线

图8为轴压作用下, GTA-0~GTD-0试件在钢管上下两端的荷载-钢管竖向应变曲线, GTA-0-U为钢管上端的荷载-钢管竖向应变曲线、GTA-0-D为钢管下端的荷载-钢管竖向应变曲线。由图8可知, 各个试件的变化趋势保持一致, 初始加载阶段钢管两端的应变较小且增长缓慢, 当荷载达到峰值承载力的80%时, 钢管上端的纵向应变随着荷载的增大快速线性增长直至屈服, 而钢管下端的应变值增长缓慢, 钢管未屈服。产生这种现象的原因是墩身承受自上而下的纵向荷载, 内置钢管的顶部与混凝土之间良好的黏结摩擦作用, 使二者共同工作, 一同承担纵向荷载。这说明内置于混合接头的钢管可有效参与承担轴向荷载。

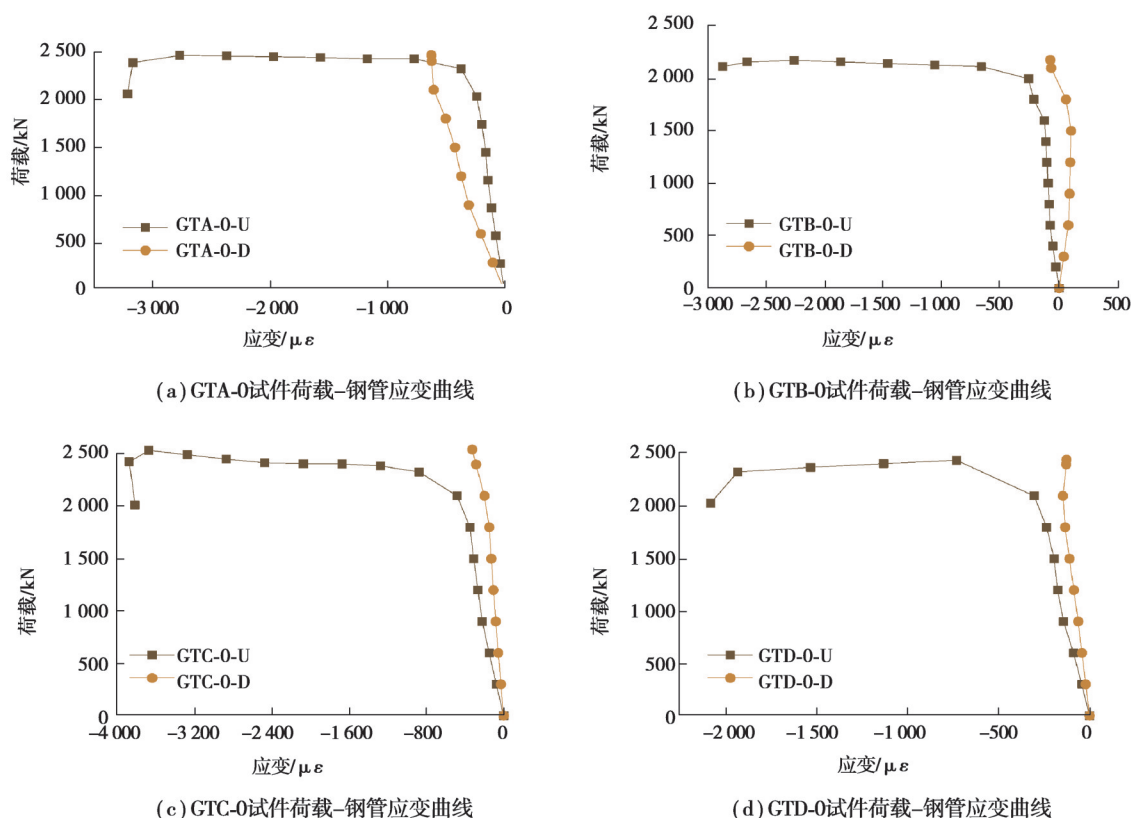


图8 轴压试件荷载-钢管应变曲线对比

Fig. 8 Axial compression test piece load-steel pipe strain curve comparison

2.4 极限承载力与延性

极限承载力与延性作为衡量构件轴压性能、变形能力的重要指标已经被广泛应用,各个试件的极限承载力与延性如表1所示。可以看出,与ZT试件相比,试件GTA-0的承载力提高了约10.8%,延性提高了约18.2%。与GTA-0相比,试件GTB-0的承载力降低了11.5%,延性降低了约13%;试件GTC-0的承载力提高了3.3%,延性提高了11.8%;试件GTD-0的承载力基本没有变化,延性降低了3.6%。试验结果表明,与整体现浇桥墩相比,内置CFST突榫的榫卯-灌浆套筒混合连接装配式方墩的承载力与延性均有一定的提升,这是由于CFST突榫的加入使得拼接部分的承载力提高所致;榫卯-灌浆套筒混合连接装配式方墩的承载力与延性,随着钢管直径的降低而降低,随着钢管长度的增加而提高;而CFST突榫中的钢管壁厚的增加对试件的承载力没有明显影响,但会降低试件的延性。

表1 轴压试件的相关试验结果

Table 1 Related test results of axial compression test piece

试件编号	承载力 N_u /kN	屈服位移 D_y /mm	极限位移 D_u /mm	延性系数 DI
ZT	2 222.8	6.06	8.67	1.43
GTA-0	2 462.2	6.17	10.43	1.69
GTB-0	2 178.4	6.44	9.47	1.47
GTC-0	2 542.9	6.39	12.07	1.89
GTD-0	2 445.2	6.52	10.62	1.63

3 有限元验证

由于实际条件限制,仅进行了1根整体现浇桥墩的轴压试验,采用文献[16]中对于整体现浇桥墩的ABAQUS建模方法来验证本文的整体现浇试件。

将有限元模拟的普通整体现浇桥墩轴压柱的荷载-竖向位移曲线与试验所测得的曲线进行对比,如图9所示。可以看出,有限元模拟的极限承载力较为接近试验值,误差为4.1%,但是峰值荷载对应的位移与试验结果还存在误差,这是因为试验构件在加工时略有偏差,如钢筋绑扎不牢,混凝土振捣不密实等,有限元的结果要比实际结果更为理想化。但总体上看试件的弹性刚度、承载力变化以及弹塑性发展趋势都较为吻合,说明文中整体现浇柱的承载力数据较为可靠。

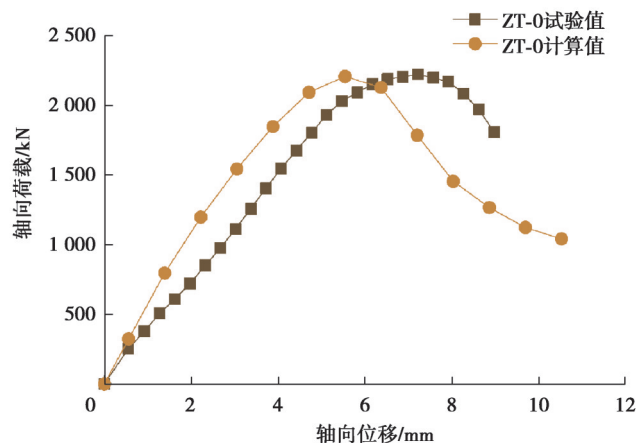


图9 试件计算值与试验值对比

Fig. 9 Comparison of calculated value and test value of test piece

4 结 论

1) 榫卯-灌浆套筒混合连接装配式桥墩的轴压承载力比整体现浇桥墩提升了10.1%~14.4%,其延性系数均不低于整体现浇桥墩。混合连接拼装桥墩的承载力随钢管直径和长度的增大而增大,而钢管的壁厚对于承载力的影响较低,其中钢管直径与试件承载力最为相关。

2) 榫卯-灌浆套筒混合连接装配式墩和整体现浇桥墩在轴压状态下的破坏模式基本一致,但破坏位置不同,整体现浇试件在受压状态下的破坏位置位于墩柱中、上部,而榫卯-灌浆套筒混合连接装配式墩的破坏位置一般位于墩柱中、下部。随着CFST突榫中的钢管长度的增加,拼装桥墩的破坏位置有所上移,逐渐接近于整体现浇桥墩。

3) 试验结果表明,采用混合连接的拼装桥墩的受压性能较好,有望在实际工程中得到推广应用。目前正在以不同截面类型、长细比、偏心率等变化参数,开展采用混合连接的拼装桥墩的受压极限承载力试验,进一步探明其在受压荷载作用下的力学性能,为实际工程的应用打下基础。

参考文献

- [1] Billington S L, Barnes R W, Breen J E. A precast segmental substructure system for standard bridges[J]. PCI Journal, 1999, 44(4): 56-73.
- [2] 王志强,葛继平,魏红一.东海大桥预应力混凝土桥墩抗震性能分析[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(11): 1462-1466, 1500.
Wang Z Q, Ge J P, Wei H Y. Seismic performance of prestressed concrete bridge column of East Sea bridge[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(11): 1462-1466, 1500.(in Chinese)
- [3] 郭熙冬.港珠澳大桥承台墩身工厂化预制施工技术[J].桥梁建设,2014,44(2): 107-111.
Guo X D. Construction techniques for factory precasting of pile caps and pier shafts of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge[J]. Bridge Construction, 2014, 44(2): 107-111.(in Chinese)
- [4] Haber Z B, Saiidi M S, Sanders D H. Seismic performance of precast columns with mechanically spliced column-footing connections[J]. ACI Structural Journal, 2014, 111(3): 639-650.
- [5] Ameli M J, Parks J E, Brown D N, et al. Seismic evaluation of grouted splice sleeve connections for reinforced precast concrete column-to-cap beam joints in accelerated bridge construction[J]. PCI Journal, 2015, 60(2): 80-103.
- [6] 谭逸波,谭昱,陈儒发,等.分节式预制墩身干接缝施工关键技术应用研究[J].公路,2015,60(11): 83-86.
Tan Y B, Tan Y, Chen R F, et al. Study on application of key technology in dry joint construction of segmental precast pier shaft[J]. Highway, 2015, 60(11): 83-86.(in Chinese)
- [7] 王景全,王震,高玉峰,等.预制桥墩体系抗震性能研究进展:新材料、新理念、新应用[J].工程力学,2019,36(3): 1-23.
Wang J Q, Wang Z, Gao Y F, et al. Review on aseismic behavior of precast piers: new material, new concept, and new application[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 1-23.(in Chinese)
- [8] 朱万旭,覃荷瑛,甘国荣,等.港珠澳大桥节段预制桥墩高强钢筋联接锚固体系的关键技术研究[J].铁道学报,2017,39(5): 118-124.
Zhu W X, Qin H Y, Gan G R, et al. Key techniques of prestressed high-strength rebar anchorage structure for segmental precast piers of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(5): 118-124.(in Chinese)
- [9] 葛继平,高飞,郑焕强,等.灌浆套筒装配式桥墩的施工工艺及其应用[J].应用技术学报,2018,18(2): 146-151.
Ge J P, Gao F, Zheng H Q, et al. The construction technology and application of grouting sleeve in assembly bridge pier column[J]. Journal of Technology, 2018, 18(2): 146-151.(in Chinese)

- [10] 欧智菁, 谢铭勤, 秦志清, 等. 带钢管剪力键的装配式混凝土桥墩抗震性能[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1169-1175, 1191.
Ou Z J, Xie M Q, Qin Z Q, et al. Study on seismic behavior of prefabricated concrete piers with steel tube shear keys[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1169-1175, 1191.(in Chinese)
- [11] 葛继平, 闫兴非, 王志强. 2段式预制拼装预应力混凝土桥墩的抗震性能[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11): 2390-2398.
Ge J P, Yan X F, Wang Z Q. Seismic performance analysis of two-segment bridge columns with prestressing bars[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(11): 2390-2398.(in Chinese)
- [12] 林上顺, 夏樟华, 赵凌志, 等. 预制拼装PC箱形墩双向拟动力试验研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(5): 33-38.
Lin S S, Xia Z H, Zhao L Z, et al. Bidirectional pseudo-dynamic test of precast and assembled prestressed concrete box pier[J]. Bridge Construction, 2019, 49(5): 33-38.(in Chinese)
- [13] 魏红一, 肖伟, 王志强, 等. 采用套筒连接的预制桥墩抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(7): 1010-1016.
Wei H Y, Xiao W, Wang Z Q, et al. Experimental study on seismic performance of precast bridge pier with grouted splice sleeve[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(7): 1010-1016.(in Chinese)
- [14] 王志强, 卫张震, 魏红一, 等. 预制拼装联接件形式对桥墩抗震性能的影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 74-80.
Wang Z Q, Wei Z Z, Wei H Y, et al. Influences of precast segmental connector forms on seismic performance of bridge pier[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(5): 74-80.(in Chinese)
- [15] 上海市城乡建设和管理委员会. 预制拼装桥墩技术规程: DG/TJ 08-2160-2015[S]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
Shanghai Urban-Rural Construction and Management Commission. Technical specification for prefabricated bridge piers: DG/TJ 08-2160-2015[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2015.(in Chinese)
- [16] 杨刚, 许斌, 陈洪兵. 钢筋混凝土柱破坏过程扩展有限元数值模拟[J]. 应用力学学报, 2018, 35(3): 602-608, 693.
Yang G, Xu B, Chen H B. Simulation of failure process of reinforced concrete columns with extended finite element method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(3): 602-608, 693.(in Chinese)

(编辑 郑洁)