

doi: 10.11835/j.issn.1000.582X.2023.10.004

方钢管约束混凝土桥墩拟静力试验

欧智菁, 陈玮悦, 林上顺, 薛文浩

(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)

摘要:为研究不同约束形式及混凝土墩身与承台间的连接构造对桥墩试件的抗震性能和各项指标的影响规律,设计 1 根采用混合接头连接的装配式方钢管约束混凝土桥墩试件(SYP-GT4 试件)、1 根方钢管约束的整体现浇混凝土桥墩试件(SYZ 试件)和 1 根方形截面的整体现浇混凝土桥墩试件(SFZ 试件)。在桥墩墩帽处采用位移加载方式完成构件的拟静力试验,观察试件的破坏过程以及破坏模式,分析了桥墩的破坏形态、荷载-位移滞回曲线、荷载-位移骨架曲线、延性、耗能等特征参数。结果表明,3 根混凝土桥墩试件的破坏形态基本一致,二者均为整体压弯破坏模式。SYZ 试件与 SFZ 试件相比,水平峰值荷载提高了 46.5%,滞回耗能能力更优,均有很好的延性性能,表明方钢管约束的整体式桥墩抗震性能优于现浇混凝土桥墩;SYP-GT4 试件与 SYZ 试件相比,水平峰值荷载数值相接近,位移延性系数提高了 24.1%,残余位移小,变形恢复能力较优,滞回曲线呈现更饱满的梭形,无明显捏缩,连接构造对强度和刚度退化的影响较小,两者抗震性能接近。

关键词:桥梁工程;方钢管约束;混凝土桥墩;拟静力试验;抗震性能;滞回曲线

中图分类号:U443.22

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)10-040-11

Quasi-static test of concrete-piers confined by square steel tube

OU Zhijing, CHEN Weiyue, LIN Shangshun, XUE Wenhao

(Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering,
Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P. R. China)

Abstract: To study the impact of different restraint methods and the connection structure between concrete piers and caps on the seismic performance and various indicators of bridge pier specimens, three experimental setups were designed: one featuring a prefabricated square steel tube confined concrete pier (SYP-GT4 specimen), another with a square steel tube confined integral cast-in-place concrete pier (SYZ specimen), and a third with a square section integral cast-in-place concrete pier (SFZ specimen). The pseudo-static test was carried out on the pier caps using displacement loading method, and the failure processes and modes of the specimen were closely observed. Various characteristics, including failure modes, load-displacement hysteretic curves, load-displacement skeleton curves, ductility, energy dissipation and other relevant parameters of the piers were analyzed. The results show that all three concrete pier specimens exhibited similar failure modes, characterized by integral failure due to

收稿日期:2021-08-29

基金项目:国家自然科学基金项目(514083128);福建省自然科学基金项目(201701471);福建省交通运输科技项目(202003)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (514083128), Natural Science Foundation of Fujian Province (201701471), and Transportation Science and Technology Project of Fujian Province (202003).

作者简介:欧智菁(1975—),女,教授,主要从事钢管混凝土组合结构研究,(E-mail)sina99@163.com。

通信作者:林上顺,男,博士,教授,(E-mail)linshangshun@fjut.edu.cn。

compression and bending. Notably, SYZ specimens outperformed SFZ specimens with a 46.5% increase in horizontal peak load, superior hysteretic energy dissipation capacity, and better ductility, indicating that integral bridge piers constrained by square steel tube demonstrate superior seismic performance compared to cast-in-place concrete piers. Furthermore, when comparing SYP-GT4 specimens to SYZ specimens, they exhibited a similar horizontal peak load value, a 24.1% increase in displacement ductility coefficient, minimal residual displacement, and enhanced deformation recovery capabilities. The hysteresis curve showed a fuller spindle shape without obvious pinching. The connection structure has little effect on the degradation of strength and stiffness, and their seismic performance is similar.

Keywords: bridge engineering; square steel tube constraint; concrete pier; pseudo-static test; seismic performance; hysteresis curve

装配式桥墩施工技术以其施工周期短、工程质量高、绿色环保、自复位能力强等特点成为我国桥梁施工技术的一个主要发展方向^[1-4]。钢管约束混凝土柱具有承载力高、塑性及韧性好,抗震性能佳、经济性好等优点^[5-7]。笔者提出了方钢管约束的装配式混凝土桥墩结构,兼具钢管约束混凝土柱的特性,同时具有施工效率高、工程质量好、简化施工流程等优点,有望成为市政桥梁中一种理想的桥墩形式。

钢管约束混凝土柱是指外包钢管不受纵向荷载,仅钢管内部的核心混凝土承受轴向荷载的组合结构柱。外包钢管的约束作用较好,具有承载力高、延性耗能佳、抗震性能好、耐火性能优和经济效果显著等优点^[8-10]。当前,国内外学者对钢管约束混凝土柱已开展了较多的抗震性能研究。甘丹等^[11]以径厚比、轴压比和剪跨比作为试验参数,对圆钢管约束钢筋混凝土短柱开展拟静力试验,发现外包圆钢管可以对核心混凝土产生明显的约束作用,提高短柱的承载力和延性。Tomii等^[12]采用拟静力试验的方法对方钢管约束钢筋混凝土短柱进行了抗震性能研究,结果表明,方钢管对核心混凝土的约束作用能够一定程度上提高方钢管约束钢筋混凝土柱的抗震性能,随着轴压比增大,试件的水平峰值荷载提高,延性性能无明显变化。Sun等^[13]以剪跨比、宽厚比为关键参数,开展了方钢管约束混凝土短柱试件的拟静力加载试验,发现方钢管约束钢筋混凝土短柱的抗震性能良好,满足工程结构抗震要求。肖岩等^[14]提出了用钢套筒局部加强钢筋混凝土柱塑性铰区域的加固方法,并对加固后的钢筋混凝土柱进行抗震性能的试验,发现钢管加固塑性铰区域的钢筋混凝土具有较好的延性性能,能够有效防止发生脆性的塑性铰区域混凝土的破坏,各项抗震性能指标也显著提高,为桥墩加固研究提供了参考。

传统的整体现浇混凝土桥梁建设周期较长,湿作业所需场地大,产生的灰尘与污水对城市环境有较大的影响。桥梁装配式技术能够提供高质量的预制标准化构件,有效控制施工质量和缩短施工周期,有效解决现浇混凝土桥梁施工技术的问题,已成为城市桥梁建设的主要施工技术方法,符合国家提倡的低碳、绿色、环保理念,顺应我国建筑工业化的时代进程^[15-17]。目前,常见的装配式混凝土桥墩结构连接形式有灌浆套筒连接、预应力筋连接及承插式连接等^[18]。国内外学者开展了较多装配式混凝土桥墩拟静力的研究,并对其抗震性能进行了系统的理论分析^[19-21],对方钢管约束混凝土柱的受力机理和抗震性能已有系统深入的认识。但关于方钢管约束的装配式混凝土桥墩的延性耗能机制、抗震设计理论等缺乏深入研究。

为研究方钢管约束混凝土桥墩在低周反复荷载作用下的滞回抗震性能和延性耗能机制,以不同约束形式及墩身与承台之间的连接构造为主要参数,开展2根方钢管约束的混凝土桥墩试件(装配式和整体式)和1根方形截面的整体现浇混凝土桥墩试件(无方钢管约束)的拟静力对比试验,对其破坏过程和模式进行对比。研究结果可为方钢管约束的装配式混凝土桥墩的工程应用提供理论参考,推动装配式桥梁的基础理论发展和技术进步,使方钢管约束的装配式混凝土桥墩形式得到进一步应用。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

以沈海高速公路福州江阴至泉州惠安段引桥桥墩为原型,采用1:8的缩尺比例及与实桥相同的钢材与混凝土材料,设计了3种类型桥墩结构:1根采用混合接头(钢管嵌套与灌浆套筒组合)连接的装配式方钢管约束混凝土桥墩试件(SYP-GT4试件),1根方钢管约束的整体现浇混凝土桥墩试件(SYZ试件),1根方形截面的整体现浇混凝土桥墩试件(SFZ试件),具体设计参数见表1。试件构造图见图1。

表1 各桥墩试件及参数

Table 1 Pier specimens and parameters

试件编号	桥墩类型	是否方钢管约束	套筒个数	是否钢管嵌套
SFZ	整体式	否	0	否
SYZ	整体式	是	0	否
SYP-GT4	装配式	是	4	是

注:S表示方形截面;Y表示墩身周围有钢管约束;P表示装配式;T表示灌浆套筒连接;G表示钢管嵌套连接;F表示墩身周围无钢管约束;Z表示整体现浇;4表示灌浆套筒连接的个数。

3根桥墩试件墩高 h 相同,均为1.5 m,墩身截面尺寸为360 mm×360 mm,方钢管及嵌套钢管均采用Q345钢材,钢管厚度为6 mm,长度为1.47 m,墩身配有8根直径为12 mm的纵筋,墩身箍筋直径为8 mm,间距200 mm。承台截面尺寸为800 mm×800 mm,高500 mm。墩帽截面尺寸为460 mm×460 mm,高度为220 mm。墩身在拼接位置埋入的钢管剪力键内径和壁厚分别为150 mm、8 mm;承台埋入的钢管剪力键凸出150 mm,其外径和壁厚分别为150 mm、8 mm,轴压比取 $r=0.1$ 。

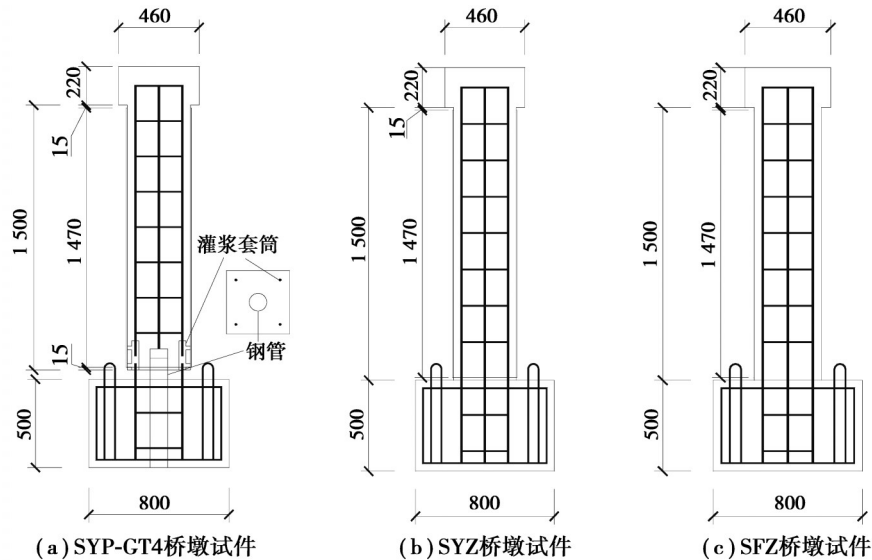


图1 桥墩构造图(单位: mm)

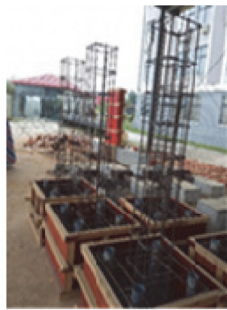
Fig. 1 Configuration of piers (unit: mm)

试验中使用的混凝土采用由福建省福州市闽侯县上街镇搅拌站生产的商品混凝土,混凝土强度等级为C40,采用福建工程学院试验室2 000 kN压力机进行材料性能测试。根据《GB/T 50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准》对混凝土试件进行材料性能测试,试验所用混凝土实测立方体抗压强度平均值为44.6 MPa,弹性模量为30.7 GPa。本次试验桥墩墩身与承台采用直径为12 mm的HRB400热轧钢筋(3级钢);试件所采用的箍筋为R235,I级光圆钢筋,直径为8 mm。方钢管以及嵌套钢管剪力键均采用Q345钢材,其主要力学指标见表2。

表 2 钢材材料性能表
Table 2 Steel material performance

材料	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa
箍筋	8	241	330	253 000
纵筋	12	415	554	206 000
方钢管		355		206 000
嵌套钢管		374		206 000

各试件承台的设计尺寸为 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 500\text{ mm}$,在承台底座四周通过空钢管加设 4 个孔洞,孔洞直径设为 80 mm ,将螺杆穿过预留在承台底座与地面的预留孔洞,并用螺栓进行固定,在承台侧面安装千斤顶,防止施加过程中承台发生侧向滑动;墩帽设计尺寸为 $460\text{ mm}\times 460\text{ mm}\times 220\text{ mm}$,为了防止试验过程中墩帽在循环荷载作用下发生松动与局部破坏,使用加载板夹住墩帽,并与作动器通过螺杆及螺栓施加预应力连接固定。方钢管在预制工厂加工成型后,运输至学校预制厂,并在预制厂中完成桥墩墩身和承台模板的支模工作,接着绑扎墩身、墩帽以及底座的钢筋,完成模板及钢筋笼的安装,然后浇筑混凝土并对其进行养护,待混凝土达到设计强度后进行桥墩试件拆模,最后进行桥墩墩身与承台的拼装工作。桥墩制作各步骤实物如图 2 所示。



(a) 绑扎钢筋



(b) 浇筑混凝土



(c) 拼装墩身与底座

图 2 桥墩制作

Fig. 2 Piers construction

1.2 试验加载方案

采用 MTS 电液伺服加载系统进行加载,试验加载装置如图 3 所示。通过高强螺栓固定试件承台与刚性地面的连接,由固定在钢横梁上的液压千斤顶施加竖向荷载,在千斤顶与试件接触部位布设传感器及钢板垫块,以保证竖向荷载能够均布在墩帽顶部维持荷载稳定,通过固定在反力墙上的电液伺服加载系统控制水平荷载。

1.3 试验加载方法

拟静力试验的加载方式采用位移加载。在正式开始前,首先取 $0.5N_0$ (N_0 为实际加载时的轴向压力) 进行预加载,确保 MTS 设备的正常运行。正式加载时,桥墩试件在达到屈服荷载前,按 1 mm 的位移间距逐级递增进行位移加载,加载循环次数为 2 次。当试件达到屈服阶段后,每级按 2 mm 的步距递增进行位移加载,加载循环次数为 3 次;当试件达到水平峰值荷载后,每级按 4 mm 的步距递增加载,加载次数为 2 次,直至试件破坏,即循环水平荷载最大值下降至水平峰值荷载的 85%。



图 3 桥墩试件加载装置

Fig. 3 Loading device for pier specimen

2 试验结果及分析

2.1 试验现象分析

2.1.1 SYP-GT4 试件

SYP-GT4试件为采用混合接头(钢管嵌套与灌浆套筒组合)连接的装配式方钢管约束混凝土桥墩(图4)。水平荷载未施加前,SYP-GT4试件处于初始状态,墩身与竖向钢架齐平;加载初期,SYP-GT4试件受力与变形稳定,墩身略微倾斜,处于弹性阶段;随着加载增大,试件墩身倾斜程度增加,试件进入弹塑性阶段;当达到2倍屈服位移时,桥墩墩身与承台连接处的混凝土受拉侧出现裂纹,受压侧现象不明显,反向施加水平荷载时,受拉与受压区位置发生转换,之前出现的裂纹被压实,另一侧有轻微裂纹产生;随着水平位移继续增加,墩身与承台间连接处的混凝土裂纹持续增多并相互交叉,直至混凝土被完全压碎;在加载后期,墩身在加载方向发生明显的弯曲现象,但方钢管无明显鼓曲显现,直至试件破坏,停止加载。加载结束后,将SYP-GT4试件外包方钢管进行剥离,发现墩身混凝土无明显裂缝;凿开预制墩身与承台连接处的混凝土时,发现内部的嵌套钢管剪力键没有明显破坏。

钢管嵌套连接的方钢管约束的装配式混凝土桥墩在试件破坏过程中主要由墩身与承台连接处的嵌套钢管承受拉力,在嵌套钢管屈服咬合过程中伴有清晰的声响;SYP-GT4试件在墩身与承台连接处混凝土先出现裂缝,随着加载的进行,在混凝土被压碎后,灌浆套筒连接的钢筋和嵌套钢管为主要受力构造,在加载后期的破坏过程中,伴随着水平位移变化,可清晰听到套筒连接间钢筋受拉及嵌套钢管间咬合时的声响。



图4 SYP-GT4试件破坏形态

Fig. 4 SYP-GT4 specimen failure

2.1.2 SYZ 试件

SYZ试件为方钢管约束的整体现浇混凝土桥墩。在加载初期,试件处于弹性阶段,方钢管未有明显变化;当墩顶位移增大时,钢管内出现清脆的响声;当墩顶位移进一步增大时,钢管内出现持续的响声,并伴随着外包钢管的上下两端混凝土的轻微剥落,且钢管出现轻微鼓曲现象。SYZ试件的破坏形态以墩身与承台连接处混凝土开裂和墩身混凝土内构造钢筋的屈服为主要特征(图5)。

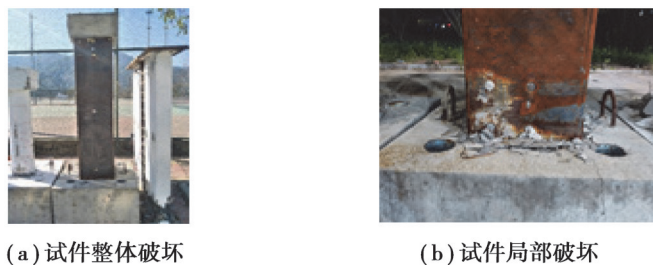


图5 SYZ试件破坏形态

Fig. 5 Failure mode of SFZ specimen

2.1.3 SFZ 试件

SFZ试件为方形截面的整体现浇混凝土桥墩,无方钢管约束。由于墩柱的破坏主要集中在下部的塑性铰区域中,对于SFZ试件,在水平位移 $\Delta=12\text{ mm}$ 时,墩身与承台交界处开始出现多段细微的横向裂缝,距承台往上约15 mm及35 mm处,细微的横向裂缝也开始出现,并向墩身侧面细微发展; $\Delta=24\text{ mm}$ 时,距承台往上约60 mm处出现细微的横向裂缝;随着水平位移增加,原先水平荷载方向同一高度的多段横向裂缝发展连

接为横跨墩身宽度的整段裂缝,并且裂缝宽度增大,墩身侧面的裂缝斜向发展并相互交织;当水平位移达到 $\Delta=28\text{ mm}$ 时,墩身与承台连接处的混凝土表面出现起皮、小块脱落的现象;在 $\Delta=36\text{ mm}$ 时,水平荷载达到峰值,墩底的混凝土在受到压、拉的荷载作用下,混凝土裂缝加深并伴有脱落的现象;至 $\Delta=56\text{ mm}$ 时,墩身底部的混凝土开始大块开裂; $\Delta=72\text{ mm}$ 时,墩底角落的混凝土完全剥落,钢筋骨架外露; $\Delta=80\text{ mm}$ 时,外露钢筋弯曲,水平承载力大幅下降,桥墩完全破坏,如图 6 所示。



图 6 SFZ 试件破坏形态

Fig. 6 Failure modes of SFZ specimen

2.2 滞回曲线

试验中 3 根桥墩试件的实测滞回曲线如图 7 所示。由图可知,加载初期,各试件的滞回曲线为一条正比例函数曲线,试件处于弹性阶段;随着水平位移增加,滞回环面积不断增大,呈较饱满的梭形,说明各试件具有良好的抗震性能,能较好地吸收地震能量。

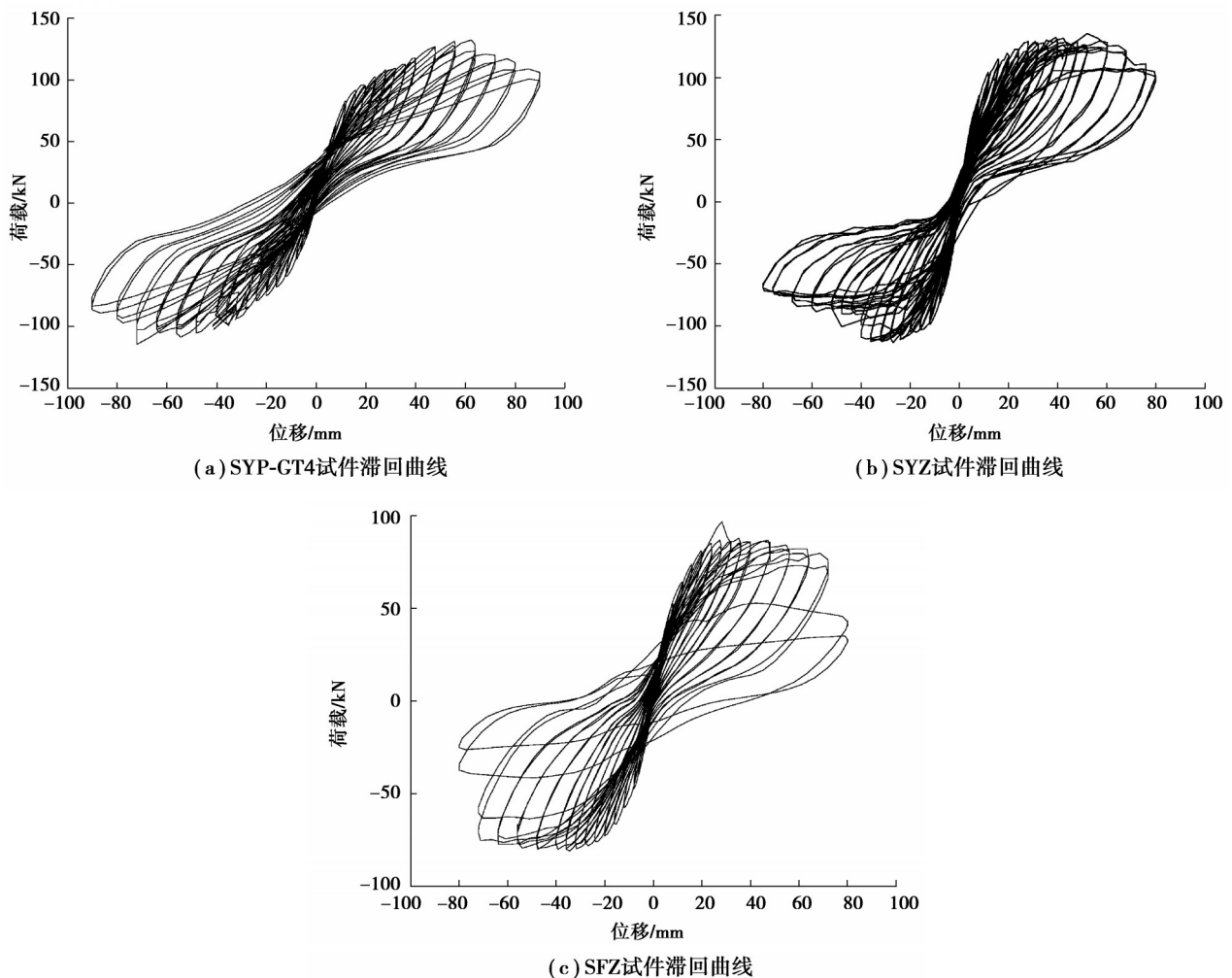


图 7 桥墩试件滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic curves of pier specimens

方钢管约束的整体现浇混凝土桥墩(SYZ试件)捏缩现象最明显。相对于方形截面的整体现浇混凝土桥墩(SFZ试件),采用混合接头连接的装配式方钢管约束桥墩(SYP-GT4试件)滞回曲线最饱满,无明显捏缩,说明SYP-GT4试件具有良好的滞回性能,在地震作用下能较好地吸收和耗散地震能量,具有更好的抗震能力。

各试件的变形过程基本一致,在加载初期,桥墩试件处于弹性阶段,曲线呈线性发展;随着位移增加,墩底塑性铰开始形成,滞回曲线略微波动,呈线性关系;当试件进入弹塑性阶段时,方钢管约束的混凝土因被挤压出现清脆的响声,而SFZ试件墩身与承台连接处出现多段横向裂缝,形成绕原点的滞回环;持续增加水平位移,试件的残余变形持续增大,荷载提升的幅度逐渐缓慢,滞回环面积不断增大且趋于饱满;当试件达到水平峰值荷载后,曲线开始呈现下降趋势。3根试件均为整体压弯破坏形态。

2.3 骨架曲线

骨架曲线是由滞回曲线各加载循环峰值点连接而形成的外包络线,可提供试件的屈服、峰值以及破坏等特征点信息^[22]。试验中3根试件的骨架曲线列于图8,骨架特征值参数列于表3。

从图8和表3可知,采用混合接头(嵌套钢管与传统灌浆套筒组合)连接的装配式方钢管约束混凝土桥墩试件(SYP-GT4试件)的承载力不弱于方钢管约束的整体现浇混凝土桥墩试件(SYZ试件),SYZ试件的水平峰值荷载与SYP-GT4试件相近,采用方形截面的整体现浇混凝土桥墩试件(SFZ试件)承载力最差。说明在实际工程中,装配式桥墩的连接部位采用混合接头(钢管剪力键和灌浆套筒相结合)的形式,有利于提高桥墩的整体性,并有效地耗散地震中的能量。

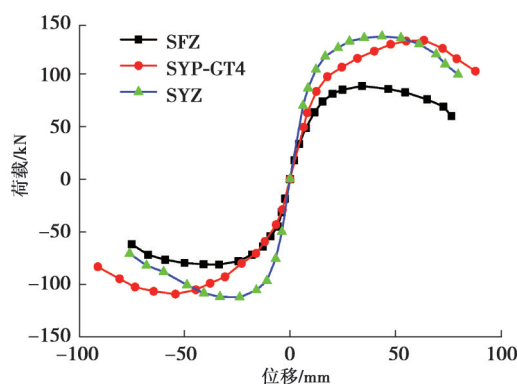


图8 各试件的骨架曲线

Fig. 8 Comparison of skeleton curves of specimens

表3 各试件骨架曲线特征参数

Table 3 Characteristic parameters of each specimen's skeleton curve

编号	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{max}/kN	P_u/kN	Δ_u/mm	μ_u
SFZ	59.0	10.4	84.6	71.9	67.8	6.5
SYZ	100.3	11.6	124.0	105.3	63.0	5.4
SYP-GT4	71.3	12.2	120.6	102.5	81.4	6.7

注: P_y 、 Δ_y 分别为屈服荷载及其对应的位移; P_{max} 为水平峰值荷载; P_u 、 Δ_u 分别为极限荷载及其对应的位移; μ_u 为位移延性系数。

上述分析表明,混合接头的连接构造相对于其他连接方式能更有效地增强装配式混凝土墩身与承台的连接强度,明显改善桥墩的受力性能,使其具有较高水平承载力和良好的抗震性能。故推荐混合接头连接的桥墩试件(SYP-GT4试件)作为实际工程应用的桥墩构造形式。

2.4 延性性能

位移延性系数 μ_u 为极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 的比值,是衡量结构延性变形能力的重要指标^[23]。各试件延性系数用位移延性系数 μ_u 表示(见表3), μ_u 值越大,表明桥墩试件的延性性能越好,根据建筑抗震试验方法规程, $\mu_u \geq 4$ 。3根桥墩试件的位移延性系数均大于4,依次为SYP-GT4>SFZ>SYZ。

由表3可知,采用混合接头(钢管剪力键和灌浆套筒相结合)连接的装配式方钢管约束混凝土桥墩延性系数最大。原因在于,随着加载位移增大,桥墩墩身与承台间的混凝土脱落,但混合接头的连接构造与墩身依旧存在咬合作用,在未达到破坏荷载前,连接处还有一定程度的滑移,因此,其延性系数偏大。

2.5 耗能能力

结构的耗能能力可用滞回环面积进行判断,本文中选用等效黏滞阻尼系数 ζ 表示,对SFZ试件、SYZ试件、SYP-GT4试件的耗能能力进行比较分析。试件耗能能力的计算方法如下所示,3根桥墩试件耗能曲线如图9所

示,黏滞阻尼系数的计算简图如图 10 所示。

$$E = \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODF}}, \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{E}{2\pi} \quad (2)$$

式中: E 为能量耗散系数; S_{ABC} 、 S_{CDA} 、 S_{OBE} 、 S_{ODF} 为图 10 中滞回曲线所包围的面积。由图 9 可知,在加载初期,各桥墩试件墩身处于弹性工作阶段,累积耗能曲线增长较为缓慢,随着加载位移的增大,墩身开始进入塑形工作阶段,钢材和混凝土的塑形变形吸收大量能量,滞回环的面积逐渐增大,累计耗能曲线增长速率也明显提升。

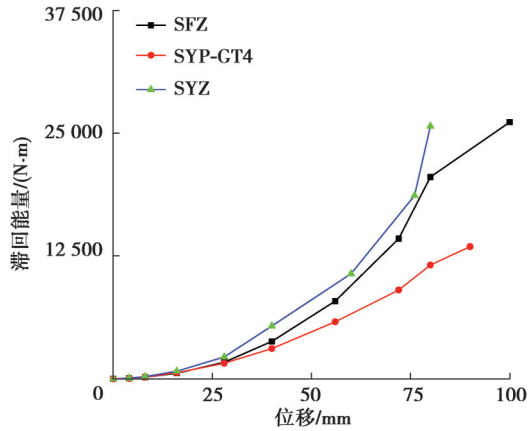


图 9 各试件耗能曲线对比图

Fig. 9 Comparison of energy dissipation curves of each specimen

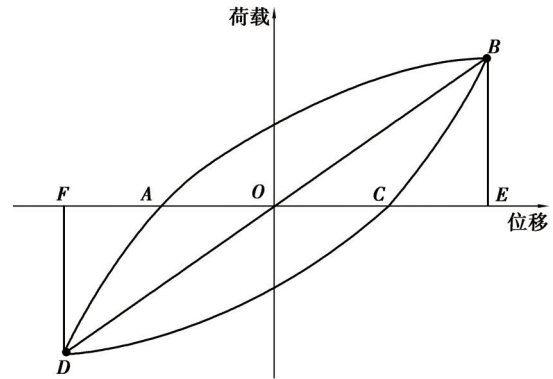


图 10 黏滞阻尼系数的计算简图

Fig. 10 Calculation diagram of viscous damping coefficient

方钢管约束的整体现浇混凝土桥墩(SYZ 试件)耗能速率及耗能能力最佳;方形截面的整体现浇混凝土桥墩试件(SFZ 试件)次之;采用混合接头的装配式方钢管约束混凝土桥墩(SYP-GT4 试件)耗能速率及耗能能力最低。表明连接构造对于方钢管约束的装配式混凝土桥墩的耗能能力有较大影响。

2.6 强度退化

强度退化反映了构件抵抗反复荷载的能力,在拟静力试验中通常用强度退化降低系数 λ_i 来定量描述, λ_i 可以由以下公式得到:

$$\lambda_i = \frac{F_i^n}{F_i^1}, \quad (3)$$

式中: F_i^n 为第 n 级位移下的水平峰值荷载; F_i^1 为第 1 级位移下的水平峰值荷载。

3 根桥墩试件的强度退化曲线如图 11 所示。由图 11 可知,在位移加载起始阶段,各个桥墩试件强度下降明显,在位移逐级加载过程中,强度退化降低系数 λ_i 波动很小,同级位移荷载下的桥墩试件强度均无明显退化,说明各试件抵抗反复荷载的能力较强。在加载前期,试件位移小,强度衰减较小,曲线均在 1 附近波动;当承载力达到峰值荷载后,强度退化降低系数持续降低,采用混合接头的装配式混凝土桥墩在受力时始终保持良好的整体性,不弱于整体式桥墩。

各桥墩试件在极限位移下的强度退化降低系数 λ_i 值列于表 4。强度退化降低系数 λ_i 的数值均在 0.95 以上。

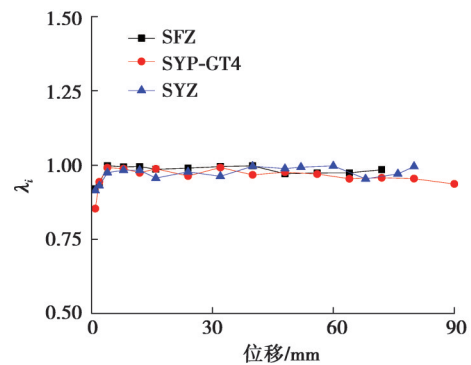


图 11 强度退化对比图

Fig. 11 Comparison of strength degradation

表4 各试件强度退化降低系数表

Table 4 Reduction coefficients of strength degradation of each specimen

试件编号	λ_i
SFZ	0.974
SYZ	0.957
SYP-GT4	0.954

2.7 刚度退化

刚度退化是指试件的刚度值在循环荷载作用下呈现减小的趋势,刚度退化规律是结构地震响应评价的重要指标,刚度退化过快的构件可能会导致结构整体垮塌的严重后果。用 K_i 表示第 i 个位移加载下的割线刚度,如式(4)所示。

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|}, \quad (4)$$

式中: P_i 表示第 i 个位移加载下的平均水平峰值荷载; Δ_i 表示第 i 个位移加载下的平均水平峰值荷载下的位移。

3根桥墩试件刚度退化曲线如图12所示,刚度特性值见表5。各桥墩试件的刚度退化速率均为先快后慢,且在位移为20 mm左右时,退化程度超过50%,其中采用混合接头的装配式方钢管约束混凝土桥墩(SYP-GT4试件)刚度退化率最低,各桥墩试件的最终刚度相近,退化率相差不大,退化率变化范围为86%~91%。

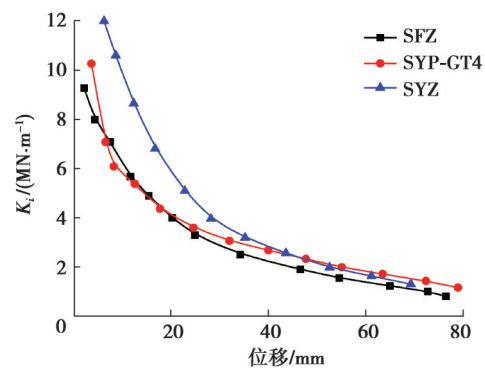


图12 刚度退化对比图

Fig. 12 Comparison of stiffness degradation

表5 各试件刚度退化特征值

Table 5 Stiffness degradation characteristic values of each specimen

试件编号	起始刚度/(MN·m ⁻¹)	最终刚度/(MN·m ⁻¹)	刚度退化/%
SYP-GT4	10.26	1.16	86
SYZ	11.99	1.30	89
SFZ	9.27	0.80	91

2.8 残余位移分析

残余位移大小表明墩身的自复位能力强弱,可用于评估桥墩是否可以继续利用,是桥梁抗震设计中作为性能化设计及抗震性能评估的重要指标。残余位移越小,则震后恢复能力越强^[24]。图13给出了3根桥墩试件残余位移曲线。从图13可看出,在加载初期,各试件的残余位移均较小,增长速率较缓,表明此时各桥墩试件均处于屈服阶段,自复位能力较强。加载后期,各试件的残余位移增长速率明显增加,各试件开始进入塑性阶段。采用混合接头的装配式方钢管约束混凝土桥墩试件(SYP-GT4

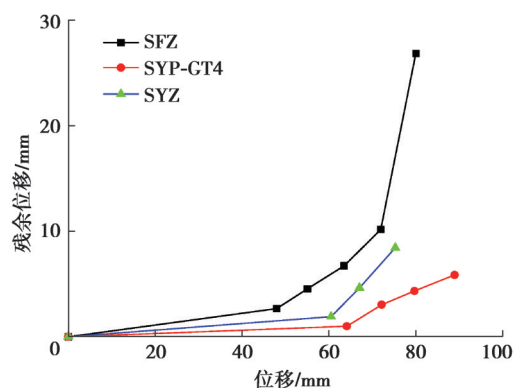


图13 残余位移对比图

Fig. 13 Comparison of residual displacements

试件)的最终残余位移最小,自复位能力最佳,原因在于试件本身受到钢管套箍作用,加载时几乎不出现大裂缝及压碎现象,能够有效改善内部钢筋的滑移,同时墩身与承台之间采用钢管剪力键加灌浆套筒连接,增强了墩身的自复位能力,产生的残余位移较小。

3 结 论

对 3 根混凝土桥墩试件开展低周反复荷载试验,基于试验和分析结果,得出以下结论:

1) 3 根混凝土桥墩试件的破坏形态基本一致,均为整体压弯破坏模式。3 根桥墩试件在加载过程中均没有明显的破坏现象,钢管未出现明显的变形、鼓曲等。采用混合接头(钢管嵌套与灌浆套筒组合)连接的装配式方钢管约束混凝土桥墩试件(SYP-GT4 试件)滞回曲线较饱满,表现出良好的抗震性能。由于方钢管的约束作用,方钢管内墩身混凝土无明显裂纹,嵌套钢管剪力键亦保持完好状态,表明 SYP-GT4 试件连接效果良好。

2) 方钢管约束的整体现浇混凝土桥墩试件(SYZ 试件)和方形截面的整体现浇混凝土桥墩试件(SFZ 试件)相比,SYZ 试件的水平峰值荷载提高了 46.5%,最终残余位移小,变形恢复能力较优。分析其原因,方钢管对混凝土墩身产生的约束作用明显提高了桥墩的受力性能,表明方钢管约束的装配式混凝土桥墩抗震性能整体优于常规混凝土桥墩。

3) 采用混合接头(钢管嵌套与灌浆套筒组合)连接的装配式方钢管约束混凝土桥墩试件(SYP-GT4 试件)与方钢管约束的整体现浇混凝土桥墩试件(SYZ 试件)相比,SYP-GT4 试件的位移延性系数提高了 24%,屈服位移提高了 5.2%,极限位移提高了 29.2%,水平峰值荷载相近,刚度退化率降低,残余位移减小。表明装配式混凝土桥墩抗震性能不亚于整体式混凝土桥墩。因此,在实际的装配式混凝土桥墩工程中,推荐采用混合接头的连接方式。

参考文献

- [1] 叶海强.全预制装配式桥墩的设计与施工要点[J].工程技术研究,2020,5(12):219-220.
Ye H Q. Key points of design and construction of fully prefabricated bridge piers [J]. Engineering Technology Research, 2020, 5(12): 219-220.(in Chinese)
- [2] 刘志磊.全预制装配式桥墩的设计技术[J].工程技术研究,2018(2):101-102.
Liu Z L. Design technology of fully prefabricated bridge piers [J]. Engineering Technology Research, 2018(2): 101-102.(in Chinese)
- [3] 张于晔.装配式桥墩抗震性能的提升方法研究进展[J].公路交通科技,2017,34(4):72-79.
Zhang Y Y. Research progress of methods for improving seismic performance of prefabricated bridge piers[J]. Journal of Highway and Traffic Science, 2017, 34(4): 72-79.(in Chinese)
- [4] Billington S L, Breen J E. Improving standard highway bridges with attention to cast-in-place substructures[J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(4):344-351.
- [5] 甘丹.钢管约束混凝土短柱的静力性能和抗震性能研究[D].兰州:兰州大学,2012.
Gan D. Study on static behavior and seismic behavior of confined concrete tubular short column[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.(in Chinese)
- [6] Guo Y L, Geng Y, Qu L Y. Time-dependent behaviour of circular steel tube confined reinforced concrete (STCRC) stub columns subjected to low axial load[J]. Engineering Structures, 2021, 243(15): 112663.1-112663.20.
- [7] Zhao T F. Bearing capacity studies on square steel tube confined steel reinforced concrete column under eccentric load[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 4212049.1-4212049.11,
- [8] 周绪红,刘界鹏,张素梅.圆钢管约束钢筋混凝土短柱的轴压力学性能[J].工程力学,2009,26(11):53-59.
Zhou X H, Liu J P, Zhang S M. Mechanical properties of reinforced concrete short columns constrained by round steel pipe[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(11): 53-59. (in Chinese)
- [9] Han L H, Yao G H, Chen Z B, et al. Experimental behavior of steel tube confined concrete (STCC) columns[J]. Steel and Composite Structures. 2005, 5(6): 459-484.
- [10] Huang F Y, Yu X M, Chen B C. The structural performance of axially loaded CFST columns under various loading conditions [J]. Steel and Composite Structures, 2012, 13(5): 451-471.

- [11] 甘丹,周绪红,刘界鹏,等.圆钢管约束钢筋混凝土短柱往复荷载作用下的组合效应[J].建筑结构学报,2015,36(S1):222-229.
Gan D, Zhou X H, Liu J P, et al. Combined effect of circular steel tube constrained reinforced concrete short columns under reciprocating load[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S1): 222-229. (in Chinese)
- [12] Tomii M, Sakino K, Xian Y, et al. Earthquake resisting hysteretic behavior of reinforced concrete short columns confined by steel tube [C]//Proceedings of the International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures, Harbin, China, August 1985: 119-125.
- [13] Sun Y, Sakino K. Earthquake-resisting performance of R/C columns confined by square steel tubes: Part I columns under high axial load [J]. Architectural Institute of Japan, 1997, 62(501): 93-101.
- [14] 肖岩,郭玉荣,何文辉,等.局部加劲钢套管加固钢筋混凝土柱的研究[J].建筑结构学报,2004,24(6):79-86.
Xiao Y, Guo Y R, He W H, et al. Retrofit of reinforced concrete columns using partially stiffened steel jackets[J]. Journal of Building Structures, 2004, 24(6): 79-86. (in Chinese)
- [15] Guo P L, Dong H Y, Yu L. Combined shear and bending behavior of joints in precast concrete segmental beams with external tendons[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(10): 1042-1052.
- [16] 谢铭勤.钢管嵌套连接装配式混凝土桥墩抗震性能研究[D].福州:福建工程学院,2021.
Xie M Q. Research on seismic performance of fabricated concrete pier with steel tube nested connection [D]. Fuzhou: Fujian College of Engineering, 2021. (in Chinese)
- [17] 展丙来,屈俊,李伟光.既有道路上方特长城市高架桥工厂化建设关键技术研究[J].公路与自然,2016,23(2):52-55.
Zhan B L, Qu J, Li W G. Research on industrialized building program for extremely long highway viaduct above existing road [J]. Highway & Nature, 2016, 23(2): 52-55. (in Chinese)
- [18] 欧智菁,薛文浩,谢铭勤,等.装配式混凝土桥墩施工技术综述[J].中外公路,2020,40(1):96-101.
Ou Z J, Xue W H, Xie M Q, et al. Summary of construction technology of prefabricated concrete bridge piers [J]. Chinese and Foreign Highways, 2020, 40(1): 96-101. (in Chinese)
- [19] 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研究[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. Prefabricated concrete with steel shear key bridge seismic performance research [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1169-1175, 1191. (in Chinese)
- [20] 江恒.灌浆波纹管连接节段拼装桥墩双向拟静力试验研究[D].福州:福州大学,2017.
Jiang H. Experimental study on bidirectional quasi-static force of grouting bellows connected segment piers[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017. (in Chinese)
- [21] 黄宜.装配式钢筋混凝土桥墩抗震性能研究[D].大连:大连理工大学,2016.
Huang Y. Research on seismic performance of prefabricated reinforced concrete piers [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [22] 田甜.钢管混凝土组合桥墩抗震性能研究[D].大连:大连理工大学,2019.
Tian T. Research on seismic performance of concrete-filled steel tubular composite piers [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [23] 陈盛富.四肢变截面钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D].福州:福建工程学院,2017.
Chen S F. Research on seismic performance of four-limb variable section concrete-filled steel tubular lattice columns [D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [24] 金龙.整体拼装式自复位桥墩抗震性能研究及改进[D].北京:北京交通大学,2019.
Jin L. Research and improvement on seismic performance of integral self-reset bridge pier [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)

(编辑 吕建斌)