

压弯剪扭复合作用下灌浆套筒装配式 RC 墩的 抗震性能

林友勤¹, 赖仕永¹, 夏樟华^{1†}, 王达荣²

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福建省交通规划设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

摘要:随着城市交通的快速发展,对其建设要求越来越高,城市桥梁主要为匝道桥、斜交桥等非规则桥梁.为得到压弯剪扭等复合地震作用下装配式墩的损伤机理和滞回特性,进行了灌浆套筒连接(Grouting Sleeve, GS)、灌浆套筒和钢管混凝土剪力键组合连接(Grouting Sleeve and Steel-tube, GSS)装配式墩和钢筋混凝土现浇(Reinforced Concrete, RC)墩等三种桥墩在压弯剪扭复合作用下的拟静力试验.结合现有混凝土结构设计规范计算剪扭相关曲线,并与试验结果进行对比,分析装配式墩复合荷载作用下的剪扭承载能力.结果表明:GS 构件与 RC 构件以压弯扭破坏为主,而插入钢管剪力键的 GSS 构件则发生塑性铰上移,呈现出剪扭破坏的特征.GS 构件和 RC 构件具有较好的弯曲耗能能力,增加钢管剪力键的 GSS 构件则可以提升抗弯承载力.装配式墩接头导致其整体性较弱,GS 构件和 GSS 构件抗扭承载力小于 RC 构件.各构件在复合荷载作用下的剪扭相关关系接近规范中的 1/4 圆理论曲线,研究结果可以为灌浆套筒连接装配式墩在压弯剪扭复合作用下的抗震性能分析提供参考.

关键词:桥梁工程;装配式墩;灌浆套筒连接;拟静力试验;压弯剪扭;承载力;延性

中图分类号:U442.55

文献标志码:A

Seismic Performance of Grouted Sleeve Fabricated RC Pier under Compression-bending-shearing-torsion Load

LIN Youqing¹, LAI Shiyong¹, XIA Zhanghua^{1†}, WANG Darong²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Provincial Transportation Planning and Design Research Institute Co., Ltd, Fuzhou 350001, China)

Abstract: With the rapid development of urban transportation, its construction requirements are increasingly high, urban bridges are mainly ramp bridges, ramps and other non-regular bridges. In order to obtain the damage mechanism and hysteresis characteristics of the fabricated pier under the combined seismic action of compression-bending-shearing-torsion, the quasi-static test for three types of bridge piers including prefabricated piers with

* 收稿日期:2023-05-23

基金项目:国家自然科学基金基金项目(51408360), National Natural Science Foundation of China(51408360); 福建省科技厅科技计划项目(2020J1477, 2022Y0046), Natural Science Foundation of Fujian Province(2020J1477, 2022Y0046); 福建省交通科技发展项目, Fujian Transportation Science and Technology Development Project

作者简介:林友勤(1975—),男,福建福清人,福州大学高级实验师,工学博士

† 通信联系人, E-mail: xiatian@fzu.edu.cn.

grouting sleeves (GS), prefabricated piers with grouting sleeve and concrete-filled steel tube (GSS) and cast-in-place reinforced concrete (RC) pier subjected to combined loads was carried out. Combining the shearing-torsion correlation curve in the existing code for design of concrete structures, the shearing and torsion load capacity of the fabricated pier under the combined load was analyzed and compared with the test results. The results show that the GS specimen and RC specimen are dominated by compression bending and torsion damage, while the GSS specimen with inserted steel tube shear keys undergo plastic hinge uplift and exhibit shear torsion damage. GS and RC specimens have better bending energy dissipation capacity, while GSS specimen with the steel tube shear key has a larger bending capacity. The assembled pier joints resulted in weaker integrity, and the torsional load capacity of the GS and GSS specimens were less than that of the RC specimen. The shear torsion correlation of each specimen under combined load is close to the quarter-circle theoretical curve in the specification. The research results can provide a reference for the seismic performance analysis of fabricated piers with grouting sleeves under the combined action of compression-bending-shearing-torsion.

Key words: bridge engineering; fabricated bridge piers; grouting sleeve connection; quasi-static test; press-bending; shearing and torsion; load capacity; ductility

随着城市化进程的加快,装配式桥墩成为了一种有力的竞争方案^[1],其中灌浆套筒连接是装配式桥墩中常用的连接方式之一^[2-4]。灌浆套筒连接方式简单、可靠、施工方便,得到了较多的研究和应用。Ameli等^[5]、魏红一等^[6]和Wang等^[7]的研究表明,桥墩和承台及桥墩和盖梁之间采用灌浆套筒连接装配式墩受力性能基本接近现浇墩,但其延性和耗能能力略小于现浇墩,其抗剪性能则与现浇墩接近^[8]。徐文靖等^[9]则认为灌浆套筒埋置于墩身的预制拼装桥墩与现浇桥墩相比,等效塑性较高度减小,位移承载能力降低。为增强装配式墩的整体性,卢干^[10]提出一种基于灌浆套筒与芯樁共同连接的拼装桥墩连接构造。邵旭东等^[11]则提出了采用UHPC的大口径全灌浆连接套筒,解决灌浆不饱满的问题。目前,国内外学者对灌浆套筒装配式墩在水平地震作用下的损伤机理和抗震等问题进行了大量的研究分析。

由于地震动的多维作用以及装配式墩向弯、斜桥等不规则桥梁的发展,在压弯剪扭等复合荷载作用下装配式墩的抗震性能研究变得十分急切。Prakash等^[12]、陈宗平等^[13]和杨阳等^[14]研究RC墩柱在压弯扭荷载作用下的抗震性能,得出结论:墩柱在复合荷载作用下的破坏程度远大于单一荷载。邓江东等^[15]、Huang等^[16]和Yu等^[17]研究了不同截面形式的RC桥墩和框架柱在压弯扭循环耦合作用下的抗震性能。墩柱在弯扭作用下其抗弯和抗扭承载力下

降明显,在扭转作用下,墩柱出现脆性破坏。2019年,Jiao等^[18]对9个钢筋混凝土RC墩进行压弯剪扭综合荷载作用,结果表明,随着梁曲率的减小和墩高的增加,墩的弯扭耦合效应更加显著。2021年,Jiao等^[19]以剪跨比和扭转比为主要变量,分别对圆形RC柱进行循环弯曲加载和循环弯扭组合加载。结果表明,扭转效应和剪切效应的增大会加大桥墩的破坏高度,削弱桥墩的耗能能力和承载能力。可以看出,已有研究主要针对复合作用下的RC墩,对非规则桥梁的装配式墩抗震性能研究较为缺乏。

为提高灌浆套筒的抗震性能,在灌浆套筒装配式墩接头位置加入钢管以提高接头的整体连接性。因此,开展灌浆套筒连接、灌浆套筒+方钢管连接装配式墩和整体现浇墩在复合荷载作用下的拟静力试验,考察其损伤机理和滞回性能,并对复合作用下灌浆套筒连接装配式墩的极限承载能力验算方法进行对比,为斜桥和弯桥等非规则桥梁的装配式桥墩相应的抗震设计及工程应用提供试验和理论依据。进一步促进桥梁结构向装配化、工业化和绿色低碳发展。

1 装配式墩压弯扭拟静力试验

1.1 构件模型设计

根据实桥尺寸,设计了3个缩尺比为1:5的构

件,整体现浇(Reinforced Concrete, RC)构件、灌浆套筒 (Grouting and Sleeve, GS) 构件、灌浆套筒+钢管 (Grouting Sleeve Steel-tube, GSS) 构件.

墩柱有效高度 1 400 mm, 截面尺寸 250 mm×250 mm, 承台尺寸 1 000 mm×800 mm×500 mm, 盖梁尺寸 1 500 mm×600 mm×400 mm. 构件混凝土为商品混凝土, 强度等级为 C35, 20 mm 的保护层厚度. 选取 8 根直径为 12 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋作为墩柱纵筋, 选取 6 mm 直径的 HPB300 光圆钢筋作为箍筋, 箍筋间距为 50 mm. 选取 10 根直径为 12 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋作为盖梁纵筋, 选取直径为 6 mm 的 HPB300 光圆钢筋作为箍筋, 箍筋间距为 100 mm. 选取直径为 10 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋作为承台钢筋, 铺设一层钢筋网片在中部, 间距为 120 mm. 轴压比设计为 0.1. 扭转比对构件的破坏形态起决定性作用且影响结构抗震性能, 参考文献 [20] 设置扭转比为 1:2. 构件参数设计及详细尺寸如表 1 和图 1 所示.

表 1 构件参数设计

Tab.1 Design parameters of specimens

构件 编号	纵筋	纵筋配 筋率/%	箍筋	箍筋配 筋率/%	轴压比	扭转比
RC	8C12	1.44	φ6@50	0.45	0.1	1:2
GS	8C12	1.44	φ6@50	0.45	0.1	1:2
GSS	8C12	1.44	φ6@50	0.45	0.1	1:2

1.2 模型材料

1.2.1 混凝土

试验所用混凝土均为商品混凝土, 强度等级为 C35. 混凝土的抗压强度和弹性模量根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)^[21] 测量. 立方体抗压强度为 41.3 MPa, 弹性模型为 31 500 MPa.

1.2.2 钢筋

试验所用 3 种钢筋, 分别为直径 6 mm 的 HPB300 光圆钢筋、直径 10 mm 的 HRB400 热轧钢筋和直径 12 mm 的 HRB400 热轧钢筋, 对同批次绑扎的钢筋进行力学性能测试. 根据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[22], 在福州大学土木工程学院万能试验机上进行测试, 钢筋性能如表 2 所示.

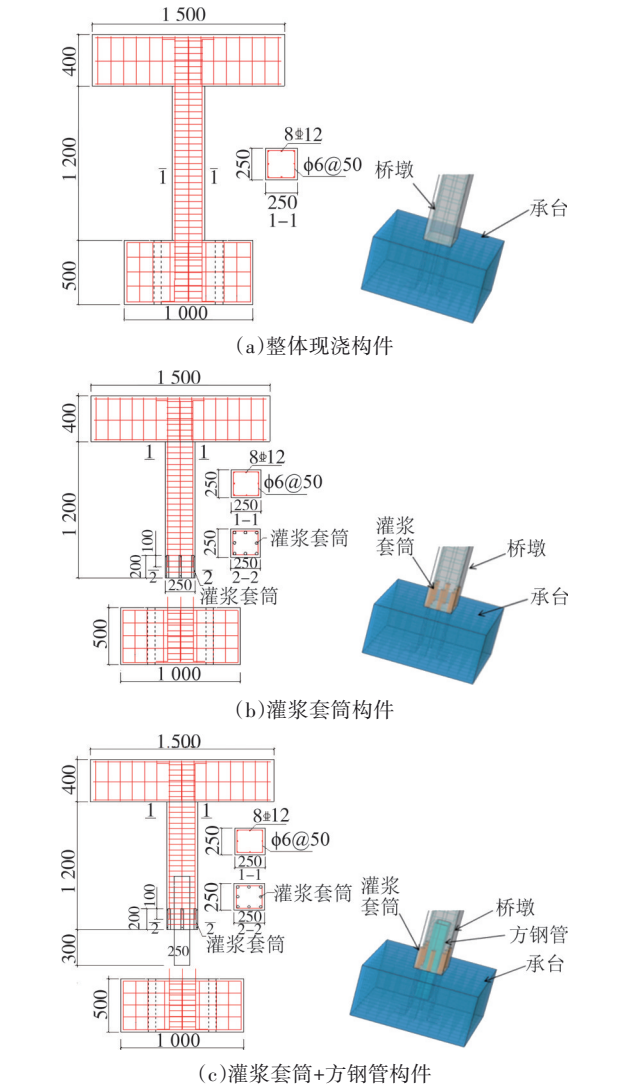


图 1 构件尺寸图 (单位: mm)

Fig.1 Dimension of the test specimens (unit: mm)

表 2 钢筋材料性能

Tab. 2 Material properties of reinforcement

直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	延伸率/%
6	318	409	21
10	411	545	23
12	422	558	26

1.2.3 灌浆套筒及钢管

灌浆套筒及钢管均采用 Q345 级钢. 其中预埋在承台里的方钢管为 150 mm×150 mm, 厚度为 4 mm, 长度为 500 mm; 预埋在墩柱里的方钢管为 120 mm×120 mm, 厚度为 4 mm, 长度为 750 mm, 其中预埋在墩柱的部分长 450 mm; 灌浆套筒采用全灌浆 12 型套筒, 屈服强度为 359 MPa, 极限强度为 547 MPa.

1.2.4 高强灌浆料

根据《钢筋连接用套筒灌浆料》(JG/T 408—

2013)^[23]和《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—1999)^[24]要求,在构件灌浆的同时,采用同批次高强灌浆料制作40 mm×40 mm×160 mm的试块,经过标准养护,高强灌浆料的初始流动度为310 mm,30 min的流动度为280 mm,抗压强度为96.8 MPa。

1.3 加载设备和加载方案

在福州大学土木工程学院2号实验馆进行此次试验.通过预留的孔洞,构件用4根高强螺杆与地梁固结.使用50 t的高精密液压千斤顶作为恒载轴力,(轴力为104.5 kN).使用两台500 kN的电液伺服作动器对构件提供扭矩、弯矩、剪力.千斤顶和水平作动器共同作用时构件进入压弯剪扭受力状态.加载模式图见图2.图中, F_1 、 F_2 分别为主副作动器力, Δ_1 、 Δ_2 分别为主副作动器位移,可得柱底截面弯矩 M 、剪力 V 、扭矩 T 和扭转比 γ .

$$M = (F_1 + F_2)H = (1 + \eta)F_1H \quad (1)$$

$$T = (F_1 - F_2)L = (1 - \eta)F_1L \quad (2)$$

$$V = F_1 + F_2 = (1 + \eta)F_1 \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{T}{M} = \frac{(1 - \eta)L}{(1 + \eta)H} \quad (4)$$

式中: L 为两加载作动器中心点的距离; H 为柱加载中心点至柱底截面高度; η 为 F_2 与 F_1 的比值,通过调节 η 可以实现对构件任意的扭转比加载。

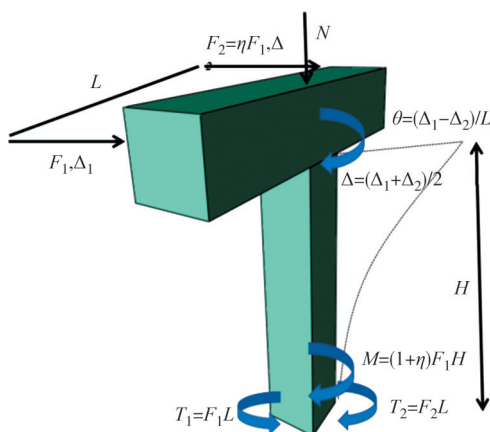
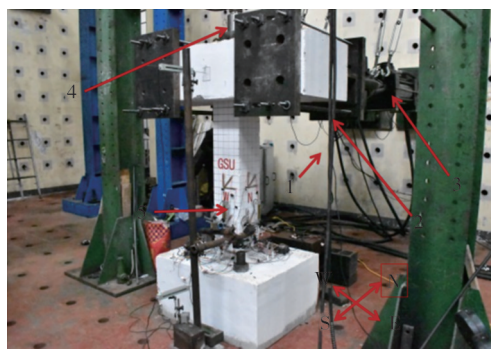


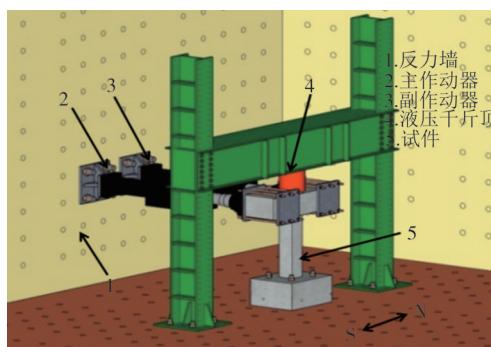
图2 加载模式图

Fig.2 Load mode diagram

加载方式通过位移控制,位移幅值通过自行定义确定,主作动器位移幅值按照每级10 mm增加,副作动器则按照扭转比大小进行加载,每级荷载循环加载两次,当荷载下降到最大承载力的85%时停止加载.加载现场图[图3(a)]和加载装置示意图[图3(b)]中1~5所指对象相同。



(a)现场加载图



(b)加载装置示意图

图3 试验加载装置

Fig.3 Schematic diagram of loading device

采用Tirasit等^[25]提出的归一化方法来确定两个作动器的加载位移.按照公式(5)~(8)进行计算:

$$r = \frac{\theta}{\delta} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{\Delta_{MTS1} - \Delta_{MTS2}}{L} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{\Delta}{L_{eff}} \quad (7)$$

$$\Delta = \frac{\Delta_{MTS1} + \Delta_{MTS2}}{2} \quad (8)$$

式中: r 为扭转比,本文采用的扭转比为1:2; θ 为构件的扭转角; δ 为构件水平加载方向的侧移率; Δ_{MTS1} 为主作动器的加载位移; Δ_{MTS2} 为副作动器的加载位移; L 为主作动器和副作动器加载中心点的距离; Δ 为构件的侧向位移; L_{eff} 为构件的有效高度,即从墩底到加载点的距离。

根据扭转比的大小和构件的尺寸去确定主作动器和副作动器的加载位移.经计算,扭转比为1:2时, $\Delta_{MTS1}:\Delta_{MTS2}=1:0.697$,加载方案如图4所示。

1.4 测点布置

应变片布置:为了解试验过程中墩柱塑性铰区的弯曲、扭转、拉压、滑移状态,需要在纵筋、箍筋和混凝土表面粘贴应变片.同时在每一个灌浆套筒中

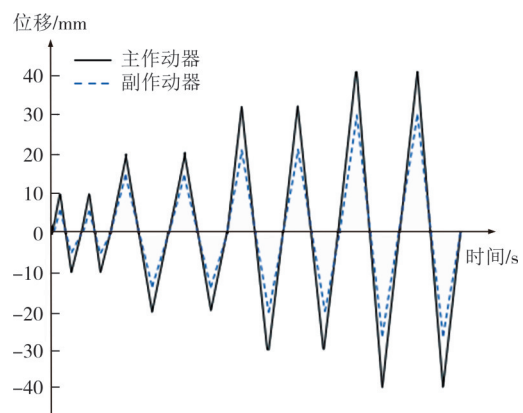


图4 加载方案
Fig.4 Loading program

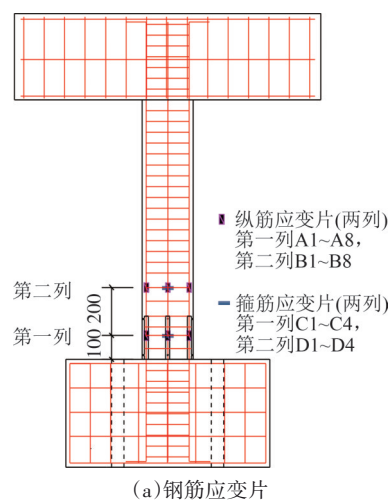
部都粘贴了钢筋应变片,以此来研究灌浆套筒的受力性能以及钢管在弯扭耦合作用下的受力机理.应变片布置和说明如图5所示.

位移计布置:为了测试墩柱的墩顶水平位移,在加载盖梁中心处布置位移计,同时分别在构件西面和北面距墩底 10 cm 和 30 cm 处布置 4 台位移计测试墩底塑性铰区曲率,共计布置 6 台位移计,详细布置如图5(b)所示.

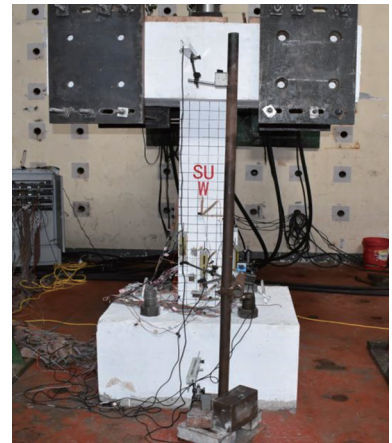
2 试验结果分析

2.1 损伤过程和破坏模式分析

观察 RC、GS 和 GSS 构件损伤破坏过程.发现在第一级加载过程中均出现裂缝,裂缝首先出现在东西两面,并且这两面斜裂缝角度一致(约 15°),随着加载位移继续增大,东西两面的裂缝分别向南北两面延伸,由东西两面延伸至南面的裂缝相互交叉,形成 X 形交叉斜裂缝,如图 6 所示.斜裂缝角度也在增大,约 45°.主要裂缝开展位于前三级,三级以后只有



(a)钢筋应变片



(b)混凝土应变片和位移计

图5 应变片和位移计布置图

Fig.5 Strain gauge and displacement gauge layout

少量较短裂缝出现.四级以后随着加载位移的增加,墩底出现较多竖向细微劈裂裂缝.第五级左右柱角开始有混凝土小碎块脱落,东西两面墩底混凝土也开始出现混凝土被压碎掉落的现象,第七级和第八级加载构件表面混凝土保护层开始大面积压碎剥落,破坏面积大都沿着主裂缝进行破坏,破坏位置基

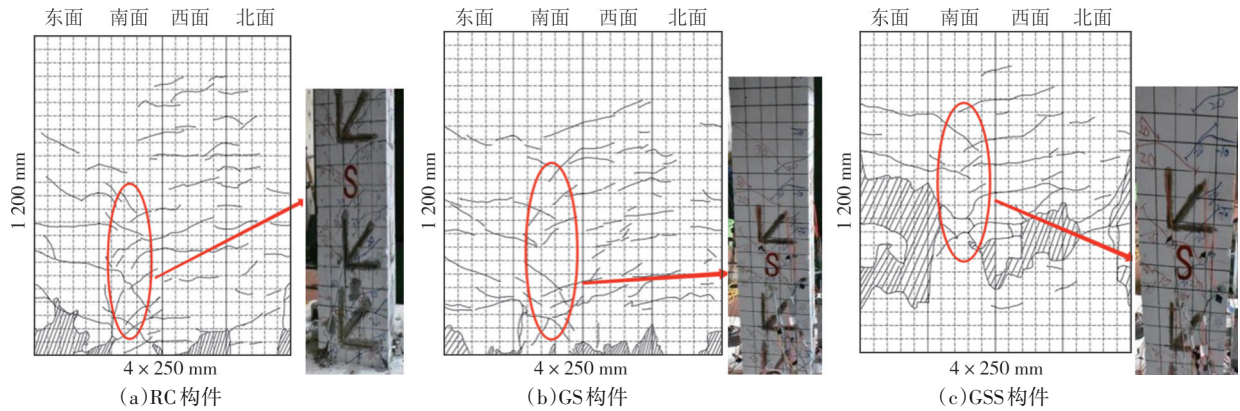


图6 各构件裂缝及破坏区域对比图

Fig.6 Comparison diagram of crack and failure area of specimens

本位于距离墩底 20 cm 范围内。

通过布置在钢筋和钢管上的应变片,测得 RC 构件在第二级加载时出现钢筋屈服,此时钢筋应力达到 450 MPa。而 GS 构件和 GSS 构件则在第一级加载时就出现了钢筋屈服现象,这说明含有墩底平接缝的构件钢筋往往较早受力屈服。RC 构件中最先屈服的纵筋在距离墩底 10 cm 处,而 GS 构件和 GSS 构件中最先出现屈服的是距离墩底 30 cm 的纵筋,而不是距离墩底 10 cm 的灌浆套筒。另外,距离墩底 10 cm 的灌浆套筒在整个加载过程中都没有屈服。这说明:1)灌浆套筒和灌浆料的连接十分可靠,可以将承台中预留纵筋的力传递给墩中的纵筋;2)灌浆套筒本身具有良好的性能。采用了方钢管的 GSS 构件在加载第二级出现了钢管屈服的现象,这也说明方钢管

在加载过程中较早的参与了受力。

RC 构件和 GS 构件的整体破坏模式以弯扭破坏为主。构件的墩底最终开裂和破坏形态如图 6 所示,细部破坏见图 7。图中,GSS 构件裂缝出现位置较其他构件高了很多,距墩底 20 cm 内几乎没有裂缝出现,最终破坏位置位于距墩底 20~70 cm 处,破坏面积和破坏程度也是 3 个构件中最大的,箍筋和纵筋都裸露在构件表面,呈现出一定的剪扭脆性破坏特征。GS 构件的破坏最轻,只在距离墩底 5 cm 内混凝土表面发生破坏,平接缝的存在使得混凝土压碎区域集中于接缝附近,但同时存在局部应力集中,钢筋拉断现象。RC 构件和 GS 构件破坏位置基本一致,主要发生在与加载方向垂直的东西两面,南北两面几乎未发生破坏,或者破坏只发生在柱角两侧,以弯扭破坏为主。

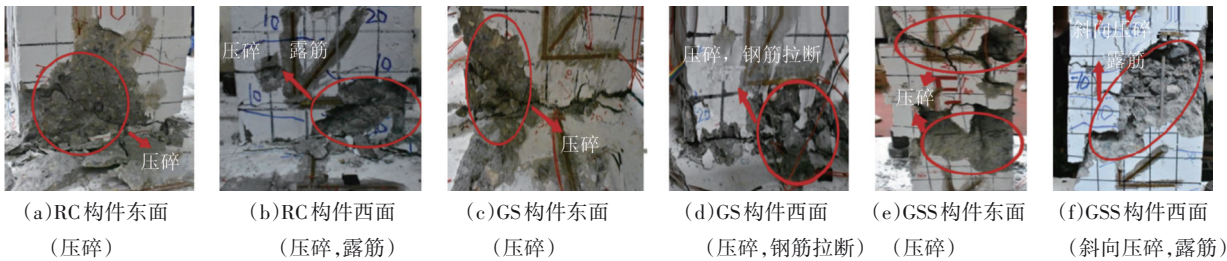


图 7 构件破坏细部图

Fig.7 Development of the diagonal cracks of test specimens

2.2 滞回曲线

三个构件的滞回曲线分别见图 8 和图 9,图中剪力为两个作动器读取剪力之和,位移采用主作动器位移。由图可知,三个构件的剪力-墩顶位移滞回环都相对较饱满,每个滞回环的形状均接近梭形,说明每个构件都具有良好的抗弯性能。

三个构件的扭矩-扭转角曲线均为典型的反 S

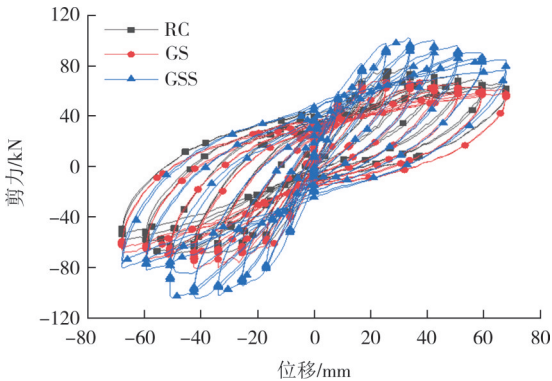


图 8 各构件的剪力-墩顶位移滞回曲线图

Fig.8 Shear force-displacement hysteresis loops of test specimens

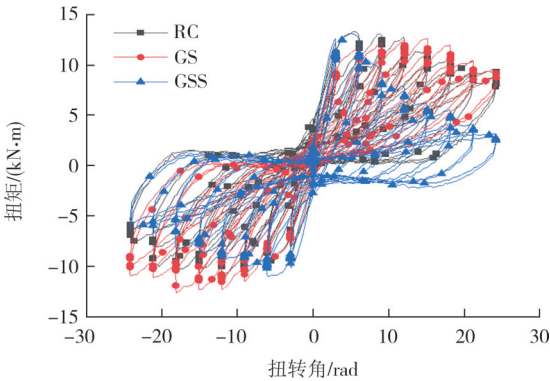


图 9 各构件的扭矩-扭转角滞回曲线

Fig.9 Torque-angle hysteresis loops of test specimens

形,每级滞回环面积均相对较小,说明构件的抗扭耗能能力较差。每个构件均产生较为明显的“捏缩”现象,这是由于混凝土开裂后,钢筋与混凝土之间的黏结-滑移产生的。除了 GS 构件承载力在第六级加载时开始下降,其他构件在第三级时开始下降。GSS 构件达到峰值荷载后承载力急剧下降,刚度退化严重,捏缩现象更为明显。

2.3 骨架曲线

各构件骨架曲线对比见图 10.可以看出,GSS 构件抗弯承载力较高,相较于 RC 构件和 GS 构件承载力分别提高了 27.6% 和 45.6%,这是因为 GSS 构件接缝处含有一根较大刚度的方钢管.而 GS 构件因为墩底接缝展开,混凝土压碎和钢筋屈服集中于墩底位置,参与受力高度相对其他两个构件小,导致其承载力最小.但 GSS 构件的承载力退化速度非常快,通过对比扭矩-扭转角骨架曲线可见,方钢管的存在并没有类似于提高抗弯承载力那样提高抗扭承载力,抗扭承载力退化快,这是由于加入方钢管使得墩底刚度增大,破坏位置上移,发生在刚度变化区域,呈现剪扭脆性破坏特征,GSS 构件试验加载过程中该构件破坏速度明显快于其他构件,导致承载力退化较快.

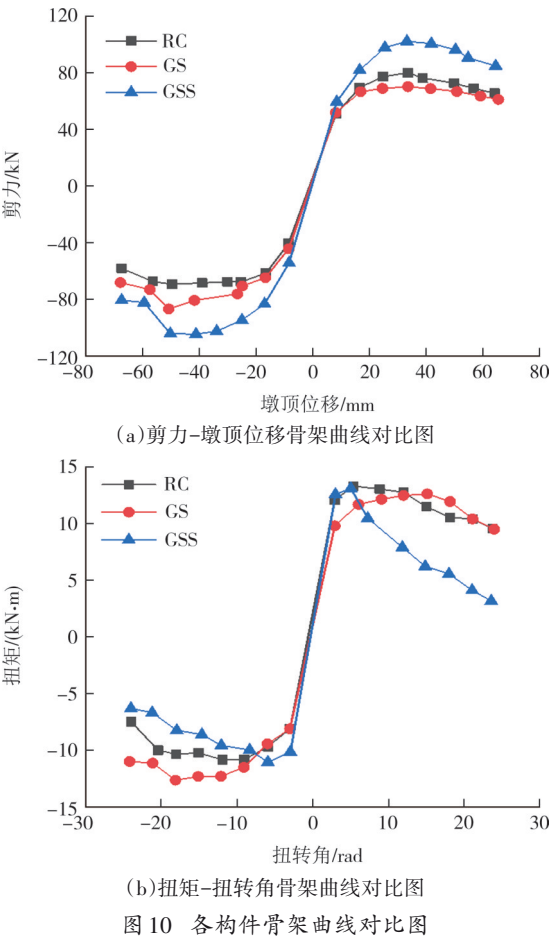


Fig.10 Comparison diagram of Skeleton curves of specimens

2.4 延性

用延性系数 u 来评定构件的位移延性,系数越大,构件变形性能就越好,计算公式为 $u = \Delta_u / \Delta_y$,其中, u 为延性系数; Δ_y 为屈服位移; Δ_u 为极限位移.骨

架曲线不能直观反映出屈服点,常用以下 3 种方法来确定屈服位移和屈服荷载:1)等能量法^[26];2)几何作图法;3)Park 法^[27].

取 3 种方法计算结果的平均值作为构件的延性指标,计算结果见表 3 和表 4.通过对比三个构件抗弯方面的延性性能,可以看出 GS 构件延性较好,远高于 RC 构件,GS 构件的位移延性系数比 RC 构件高 45.0%,其主要原因是 GS 构件变形更集中于接缝处,钢筋更早屈服,而极限位移与 RC 构件接近.GSS 构件的延性低于 RC 构件和 GS 构件,GSS 构件的延性系数比 RC 构件和 GS 构件分别低 10.8% 和 38.5%,GSS 构件虽然承载力提高,但存在脆性破坏,位移延性降低.对比三个构件抗扭方面的延性性能,可以看出 GS 构件的延性性能和 RC 构件大致相同,相差 4.0%,而 GSS 构件的转动延性性能远远低于其他构件,GSS 构件的延性系数比 RC 构件和 GS 构件分别低 54.6% 和 55.0%,延性较差,抗震性能较差.

表 3 实测剪力-位移曲线特征点

Tab.3 Calculation results of characteristic points of shear-displacement curve

构件	屈服荷载 P_y / kN	屈服位移 Δ_y / mm	峰值荷载 $P_{\max} / \text{kN}$	极限位移 Δ_u / mm	延性系数 μ
RC	69.80	16.73	80.23	58.76	3.51
GS	60.03	12.95	70.29	65.53	5.09
GSS	87.36	19.52	102.37	61.15	3.13

表 4 实测扭矩-扭转角曲线特征点

Tab.4 Calculation results of characteristic points of torque-displacement curve

构件	屈服扭矩 $T_y /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	屈服转 角 θ_y / rad	峰值扭矩 $T_{\max} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	极限转 角 θ_u / rad	延性系 数 μ
RC	12.34	3.37	13.35	15.58	4.63
GS	10.76	4.46	12.66	20.52	4.67
GSS	12.66	3.20	13.14	6.72	2.10

2.5 耗能能力

通过计算得到各构件的滞回耗能,见图 11、图 12.对于抗弯耗能,对比分析 RC、GS 和 GSS 三个构件,加载位移为 67.9 mm 时,GSS 构件累计抗弯耗能比 RC 构件多 34.8%. GSS 构件累计抗弯耗能比 GS 构件多约 30.3%.可以看出,GSS 构件抗弯耗能较高,因为方钢管增强了构件的耗能性能,GS 构件具有和 RC 构件类似的抗弯耗能.

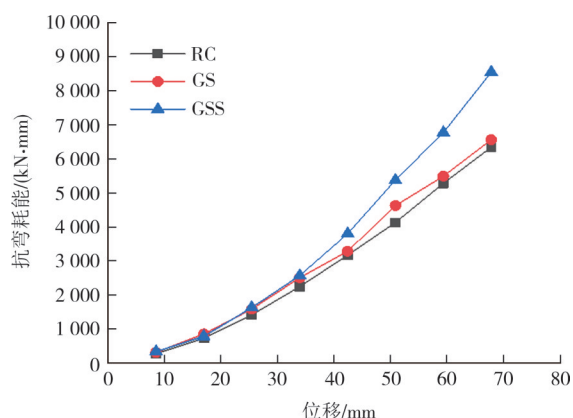


图11 各构件抗弯耗能曲线对比图

Fig.11 Comparison diagram of flexural energy dissipation curve of specimens

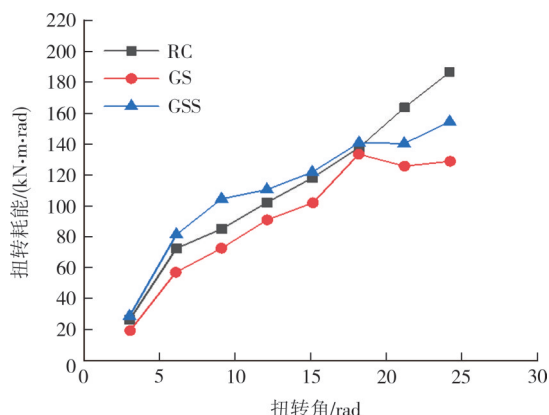


图12 各构件抗扭耗能曲线对比图

Fig.12 Comparison diagram of torsional energy dissipation curve of specimens

对于抗扭耗能性能,可以发现在前六级加载过程中GSS构件耗能最好,RC构件次之,GS最差,后两级GS和GSS构件耗能明显低于RC构件,GS构件更是出现了下降的现象.RC构件累计扭转耗能比GSS构件多20.8%.RC构件的累计扭转耗能比GS构件多44.9%.分析认为GSS构件中的钢管在前几级加载中参与了大量耗能,但后期混凝土发生了大面积破坏,混凝土和钢管之间失去了协同作用,后期抗扭耗能显著下降.可以发现,采用了墩底平接缝的GS构件和GSS构件在加载后期的抗扭耗能明显低于整体现浇构件.

2.6 残余位移

各构件残余位移随位移等级的变化曲线见图13.可以看出,每个构件正向和负向加载时的残余位移差别较大,由于每级先进行正向加载,再进行负向加载,导致正向加载时的损伤对负向加载时的残余位移产生影响,致使负向位移加载时残余位移较大.

对比分析RC、GS和GSS构件的正向加载残余位移,可以看出GS构件的残余位移最大,RC构件的残余位移最小.相同加载位移下,GS构件最大残余位移达到35.3 mm,GSS和RC构件的残余位移分别为GS构件的56.6%和31.5%.但是在负向加载时GSS构件残余位移变成了最小,GSS构件在受力后,钢管剪力键会发生弹性变形,由于每级先进行正向加载,钢管产生正向偏移,再进行负向加载时,其弹性性能使其往负向的位移减小,导致负向残余位移降低.总体来说,装配式构件的残余位移都比整体现浇构件大,其主要原因在于复合作用下装配式墩损伤更大.

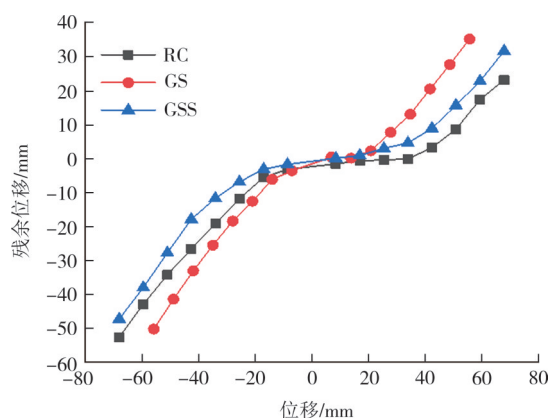


图13 各构件残余位移曲线对比图

Fig.13 Comparison diagram of residual displacement curve of test specimens

3 复合荷载作用下装配式墩承载能力分析

进一步分析压弯剪扭复合作用下装配式墩实测承载力与现有规范计算值的关系,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[28]中矩形截面钢筋混凝土框架柱在轴向压力、剪力、弯矩和扭矩共同作用下,其受扭承载力计算公式如下:

$$T \leq \beta_t (0.35f_t + 0.07 \frac{N}{A}) W_t + 1.2 \sqrt{\xi} f_{yv} \frac{A_{stl} A_{cor}}{s} \quad (9)$$

$$\beta_t = \frac{1.5}{1 + 0.5 \frac{V W_t}{T b h_0}} \quad (10)$$

式中: T 为扭矩设计值; β_t 为一般剪扭构件混凝土受扭承载力降低系数; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值; N 为轴力设计值; A 为构件截面面积; W_t 为扭构件的截面受扭塑性抵抗矩; ξ 为受扭的纵向普通钢筋与箍筋的配筋强度比值; f_{yv} 为受扭箍筋的抗拉强度设计值; A_{stl} 为沿截面周边配置的箍筋单肢截面面积; A_{cor} 为截面核心部分的面积; V 为剪力设计值; b 为矩

形截面的短边尺寸; h_0 为构件截面有效高度.

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[29]计算方法与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)较为接近,而 AASHTO LRFD—2010^[30]、EN 1992-1-1:2004^[31]和 BS 5400-4:1990^[32]均未考虑混凝土抗拉强度,仅按照纯扭构件计算受扭钢筋.

根据本文设计的试验构件尺寸,分别用各国规范对 RC 构件进行压弯剪扭复合作用下抗扭承载力计算,结果见表 5.从表 5 可以看出,我国的两种规范对于抗扭承载力的计算比较一致,美国 AASHTO LRFD-2010 和英国 BS 5400-4:1990 计算结果较小,上述欧美规范均未考虑混凝土抗拉强度等因素.

表 5 RC 构件抗扭承载力计算结果对比
Tab. 5 Comparison of calculation results of torsional load capacity

规范	抗扭承载力/(kN·m)
中国 GB 50010—2010	12.84
中国 JTG 3362—2018	12.23
美国 AASHTO LRFD—2010	10.18
欧洲 EN 1992-1-1:2004	—
英国 BS 5400-4:1990	8.85

根据骨架曲线,试验所得 RC 构件抗扭承载力为 13.35 kN·m.对比计算结果,可以发现构件抗扭承载力较接近《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中的承载力理论值,因此本文采用该规范中的抗剪承载力、抗扭承载力公式以及剪扭承载力相关关系进行验证.计算结果见表 6.

表 6 各试件计算抗剪、抗扭承载力
Tab. 6 Flexural and torsional load capacity of specimens

构件	抗剪承载力/kN	抗扭承载力/(kN·m)	抗扭承载力试验值/(kN·m)
整体现浇	80.23	12.84	13.35
GS	70.29	11.66	12.66
GSS	102.37	12.13	13.14
纯扭构件	—	15.52	—
纯剪构件	115.8	—	—

根据规范可知,压弯剪扭复合作用下的矩形截面构件剪扭承载力相关曲线近似为 1/4 圆,将表 6 中的抗剪、抗扭承载力代入该曲线,可以得到如图 14 所示的各构件抗剪、抗扭承载力关系.图 14 中, T 和 V 分别为构件抗扭承载力和抗剪承载力, T_0 和 V_0 分别为纯扭矩形有腹筋构件抗扭承载力和纯剪矩形腹筋

构件抗剪承载力,可以看出,各构件在复合荷载作用下的剪扭相关关系贴近规范中的 1/4 圆理论曲线,试验得到的抗剪承载力和抗扭承载力均高于理论值,其中 GS 构件总体剪扭承载力最小.

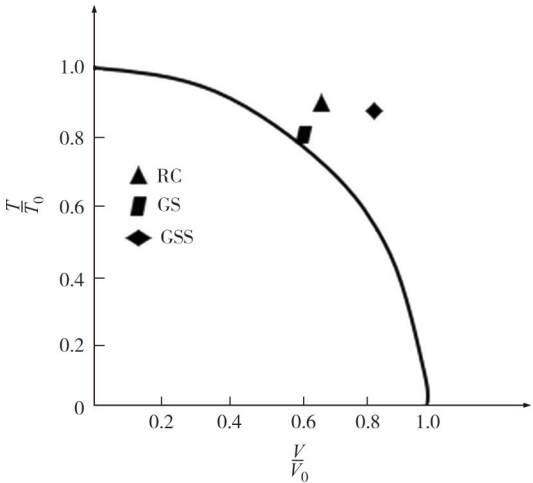


图 14 各构件剪扭承载力相关关系
Fig.14 Correlation between shear and torsional load capacity of test specimens

4 结论

1)压弯剪扭复合作用下灌浆套筒装配式墩和现浇墩破坏模式总体上接近,均以受弯破坏为主的弯扭破坏,而插入钢管剪力键的灌浆套筒装配式墩则发生塑性铰上移,破坏位置位于桥墩中部,呈现出剪扭破坏的脆性破坏特征.

2)灌浆套筒装配式墩与整体现浇桥墩的剪力-墩顶位移滞回曲线都相对饱满,均具有较好的弯曲耗能能力,而 GSS 构件由于增加了钢管剪力键,其抗弯承载力得到提升,但脆性破坏模式导致其耗能能力明显降低.

3)装配式桥墩与整体现浇桥墩的扭矩-扭转角滞回曲线都相对不饱满,每级滞回环均为典型的反 S 形,因此抗扭性能对于复合荷载作用下的桥墩抗震更为关键.由于现浇构件整体性强,箍筋约束效应较好,扭转耗能能力和抗扭承载力均大于灌浆套筒装配式墩,说明装配式墩的接缝降低了其整体性和抵抗复合荷载的能力.

4)各构件在复合荷载作用下的剪扭相关关系贴近规范中的 1/4 圆理论曲线,试验得到的抗剪、抗扭承载力均高于理论值,采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)进行灌浆套筒连接装配式墩剪扭

承载力计算偏保守。

综合分析,灌浆套筒连接,灌浆套筒和钢管组合连接装配式墩抵抗复合荷载作用的能力总体低于现浇墩,后续研究可以通过适当措施增加其连接整体性,更好地满足非规则桥梁装配式墩的建设需求。

参考文献

- [1] 项贻强,竺盛,赵阳. 快速施工桥梁的研究进展[J]. 中国公路学报,2018,31(12):1-27.
XIANG Y Q, ZHU S, ZHAO Y. Research and development on accelerated bridge construction technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12):1-27. (in Chinese)
- [2] 周良,闫兴非,张凯龙,等. 工业化全预制桥梁设计施工关键技术研究及应用[J]. 建设科技,2018(16):53-55.
ZHOU L, YAN X F, ZHANG K L, et al. Research and application of key technologies in the design and construction of the industrialized prefabricated bridge[J]. Construction Science and Technology, 2018(16):53-55. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 陈家勇. 预制装配桥墩的构造设计及抗震性能研究[D]. 南京:东南大学,2014.
CHEN J Y. Study on structural design and seismic performance of precast assembly pier [D]. Nanjing: Southeast University, 2014. (in Chinese)
- [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] 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)
- [7] WANG R L, MA B, CHEN X. Seismic performance of pre-fabricated segmental bridge piers with grouted splice sleeve connections[J]. Engineering Structures, 2021, 229:111668.
- [8] 王志强,张杨宾,蒋仕持,等. 套筒连接的预制拼装桥墩抗剪性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(6):767-775.
WANG Z Q, ZHANG Y B, JIANG S C, et al. Experimental study of shear performance of precast segmental bridge piers with grouted splice sleeve[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(6):767-775. (in Chinese)
- [9] 徐文靖,马翥,黄虹,等. 套筒连接的预制拼装桥墩抗震性能研究[J]. 工程力学,2020,37(10):93-104.
XU W J, MA B, HUANG H, et al. The seismic performance of precast bridge piers with grouted sleeves [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10):93-104. (in Chinese)
- [10] 卢干. 基于灌浆套筒与芯棒连接的预制拼装桥墩抗震性能研究[D]. 南京:东南大学,2019.
LU G. Seismic performance of precast piers connected with both grouted splice sleeve and grouted central tenon [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [11] 邵旭东,刘也萍,邱明红,等. 采用UHPC灌浆材料大口径全灌浆连接套筒接头的性能研究[J]. 土木工程学报,2020,53(2):81-91.
SHAO X D, LIU Y P, QIU M H, et al. Research on performance of large diameter grout-filled splice sleeve joints with UHPC[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(2):81-91. (in Chinese)
- [12] PRAKASH S, BELARBI A, YOU Y M. Seismic performance of circular RC columns subjected to axial force, bending, and torsion with low and moderate shear[J]. Engineering Structures, 2010, 32(1):46-59.
- [13] 陈宗平,刘祥,陈建佳. 型钢混凝土十字形柱复合受扭滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(6):108-118.
CHEN Z P, LIU X, CHEN J J. Experimental study on hysteretic behavior of steel reinforced concrete cross-shaped column under combined action of compression-flexure-shear and torsion [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(6):108-118. (in Chinese)
- [14] 杨阳. 压弯剪扭复合作用钢筋混凝土T形柱抗震性能研究[D]. 南宁:广西大学,2017.
YANG Y. Study on seismic behavior of reinforced concrete T-shaped column under compression-flexure-shear and torsion combined action [D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese)
- [15] 邓江东,刘爱荣,孙卓,等. 弯扭耦合效应下混凝土桥墩的抗震性能[J]. 中国公路学报,2017,30(6):249-259.
DENG J D, LIU A R, SUN Z, et al. Seismic performance of concrete bridge columns under bending-torsion coupling effect [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6):249-259. (in Chinese)
- [16] HUANG H, HAO R Q, ZHANG W, et al. Experimental study on seismic performance of square RC columns subjected to combined loadings[J]. Engineering Structures, 2019, 184:194-204.
- [17] YU Z G, SHAN D S. An experimental study on behaviour of reinforced concrete T-shaped columns subjected to combined loads [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(3):906-919.
- [18] JIAO C Y, LI J Z, WEI B, et al. Experimental investigations on

- seismic responses of RC circular column piers in curved bridges [J]. *Earthquake and Structures*, 2019, 17(5), 435 - 445.
- [19] JIAO C Y, LIU Y, WEI B, et al. Seismic performance of circular reinforced concrete columns subjected to compression, bending and torsion with low and moderate shear span ratio [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, 21(3): 135.
- [20] 王宇航, 聂建国, 樊健生, 等. 罕遇地震下曲线钢-混凝土组合梁桥的墩柱扭转效应[J]. *工程力学*, 2014, 31(9): 42-50.
- WANG Y H, NIE J G, FAN J S, et al. Torsion effect in piers of curved steel-concrete composite bridges under rare earthquake [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(9): 42-50. (in Chinese)
- [21] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese)
- [22] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- Metallic materials—tensile testing—part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [23] 钢筋连接用套筒灌浆料: JG/T 408—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- Cementitious grout for coupler of rebar splicing: JG/T 408—2013 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)
- [24] 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—1999[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- Method of testing cements—determination of strength: GB/T 17671—1999 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999.
- (in Chinese)
- [25] TIRASIT P, KAWASHIMA K. Seismic performance of square reinforced concrete columns under combined cyclic flexural and torsional loadings [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2007, 11(3): 425-452.
- [26] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- HU Y X. *Earthquake engineering* [M]. Beijing: Seismological Press, 2006. (in Chinese)
- [27] PARK R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing [J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 1989, 22 (3) : 155-166.
- [28] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [29] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)
- [30] Bridge design specifications: AASHTO LRFD—2010 [S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
- [31] Eurocode 2: design of concrete structures: EN 1992-1-1: 2004 [S]. London: British Standards Institution, 2004.
- [32] Steel, concrete and composite bridge, part 4: code of practice for design of concrete bridges: BS 5400-4: 1990 [S]. London: British Standards Institution, 1990.