

文章编号:1671-1637(2018)02-0042-11

灌浆套筒和预应力筋连接的预制拼装 桥墩的抗震性能

葛继平¹, 闫兴非^{2,3}, 王志强⁴

(1. 上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海 201418; 2. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 3. 上海工业化装配式市政工程技术研究中心, 上海 200125; 4. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要:针对轨道交通预制拼装桥墩的受力特点,提出了采用灌浆套筒和预应力筋连接的拼装方案;设计了3种不同类型桥墩,包括整体现浇试件(RC)、预应力钢绞线和灌浆套筒连接的预制拼装试件(PCSS)与精轧螺纹钢筋和灌浆套筒连接的预制拼装试件(PCTS),采用拟静力试验方法分析了各种桥墩的各种拟静力指标,比较了桥墩的抗震性能。试验结果表明:PCSS和PCTS试件的各指标非常接近,最大误差为2.2%;灌浆套筒会使传统塑性铰区上移至套筒顶部,说明灌浆套筒对传统塑性铰区域具有局部增强作用,建议对塑性铰的箍筋加密区高度应额外增加1个套筒高度;采用预应力筋使试件的混凝土轴压力增大了1倍,相应的开裂荷载也增大了约1倍;PCSS试件的屈服荷载和极限荷载正负向均值比RC试件分别提高了31%和34%,等效屈服位移、极限位移和偏移率均值分别比RC试件提高了17%、13%、13%,但是PCSS试件的延性系数平均降低了10%;在偏移率为6%时,PCSS试件的残余位移均值是RC试件的61%,显示了较好的自复位能力;与RC试件相比,PCSS试件的刚度提高了13%。相比于精轧螺纹钢筋,钢绞线可以适当弯曲与成束,面积调整灵活,因此,采用无黏结预应力筋和灌浆套筒连接的桥墩试件具有良好的使用性能和抗震性能,可作为预制拼装轨道桥墩的推荐方案。

关键词:铁路桥梁;预制拼装桥墩;抗震性能;拟静力试验;灌浆套筒;预应力筋

中图分类号:U443.22 **文献标志码:**A

Seismic performance of prefabricated assembled pier with grouted sleeve and prestressed reinforcements

GE Ji-ping¹, YAN Xing-fei^{2,3}, WANG Zhi-qiang⁴

(1. School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 2. Shanghai Urban Construction Design Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 3. Shanghai Technology Research Center of Industrial and Prefabricated Municipal Engineering, Shanghai 200125, China; 4. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the mechanical characteristics of prefabricated assembled piers for rail transit, the assembly scheme of grouted sleeve and prestressed reinforcements was put forward. Three different types of piers were designed, including the integral cast-in-place reinforced concrete specimen (RC), the prefabricated and prestressed concrete specimen with strands and

收稿日期:2017-11-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51408360);上海市科委工程技术研究中心建设项目(17DZ2251900)

作者简介:葛继平(1979-),男,江苏海安人,上海应用技术大学副教授,工学博士,从事预制拼装桥墩抗震研究。

grouted sleeves (PCSS), and the prefabricated and prestressed concrete specimen with screw thread steel bar and grouted sleeve (PCTS). The evaluation results of various pseudo-static evaluation indicators for each type of bridge pier were analyzed by using pseudo-static test method. The seismic performances of various kinds of piers were compared. Test result shows that the indexes of PCSS and PCTS are very similar, and the maximum error is 2.2%. The grouted sleeve shifts the traditional area of plastic hinge up to the top of grouted sleeve, so it shows that the grouted sleeve has local reinforcing effect on the traditional plastic hinge region, and the height of plastic hinge stirrup is advised to add extra one height of grouted sleeve. The concrete axial pressure of specimen increases by 1 time when using prestressed reinforcements, and the corresponding cracking load also increases by approximate 1 time. The mean values of yield load and ultimate load of PCSS are 31% and 34% higher than those of RC, respectively. The average equivalent yield displacement, ultimate displacement and drift ratio are 17%, 13% and 13% higher than those of RC, respectively, but the ductility factors of PCSS decreases by 10%. At the same drift ratio of 6%, the mean residual displacement of PCSS is 61% of RC, which shows better re-centering capacity. Compared with RC, the stiffness of PCSS increases by 13%. Compared to screw thread steel bar, steel strands can be bent and bundled, and the area is flexible to adjust. So the bridge pier specimens with unbonded prestressed reinforcements and grouted sleeve have better operation and seismic performance, and can be served as the recommended scheme for prefabricated assembled rail pier. 6 tabs, 19 figs, 26 refs.

Key words: railway bridge; prefabricated assembled pier; seismic performance; pseudo-static test; grouted sleeve; prestressed reinforcement

Author resume: GE Ji-ping(1979-), male, associate professor, PhD, bridgejiping@126.com.

0 引言

近年来城市交通量大幅增大,早期基础设施服役年限将至,采用新体系和方法提高公路桥梁的施工速度成为城市发展的主流^[1]。预制节段方式是可以代替现行现浇方式的施工方法之一。与常规施工技术相比,桥梁快速施工技术可以缩短现场施工时间,最大限度降低对现有交通的干扰,施工过程中的废水、废气和粉尘的排放能得到最大程度的控制,增加施工安全性和施工质量,降低运营期内的成本^[2-3]。

20世纪60年代, Yee等发明了灌浆套筒连接方法,解决了装配式结构中的纵筋连接问题,可以实现装配与现浇等同的设计思想^[4-5];吴涛等通过拉伸试验和传力过程分析证明灌浆套筒具有可靠的钢筋连接性能^[6-9];陈项南等研制出新型变形套筒^[10-11]; Sayadi等研究了外贴玻纤布的套筒在设计中的关键影响因素^[12]; Henin等提出了一种新型灌浆套筒,通过试验和理论分析研究了套筒的承载能力以及灌浆料与套筒间的摩擦因数^[13],这种基于钢筋连接的预制拼装桥墩技术具有显著的优点,所以在房建和

桥梁等领域获得了广泛的应用^[14-16]。

灌浆套筒接头大多设置在构件受力较大的部位,且同一结构接缝处纵向钢筋是100%连接。此外,与其他的机械连接接头相比,接头尺寸和刚度均较大,是否会影响构件的基本静力性能和抗震性能,需要进行相关试验研究。张臻对采用灌浆套筒连接的预制拼装柱的抗震性能进行了系统研究,特别是预制柱的抗震性能随轴压比、灌浆料强度变化等的规律^[17];章一萍等研究了预留水平连接缝形式对采用灌浆套筒连接纵筋的预制钢筋混凝土短柱抗震性能的影响^[18]; Pantelides等对不同位置的全灌浆套筒和半灌浆套筒进行对比分析,与参考柱相比,拼接柱位移延性能力有所降低,套筒位于承台上面且套筒下方钢筋无黏结的柱抗震性能最好^[19]。灌浆套筒连接的预制钢筋混凝土柱和桥墩的低周反复加载试验表明^[20-23];与现浇桥墩相比,预制混凝土桥墩的水平承载力、耗能能力和延性等性能与之接近,但两者破坏模式差异较大;对于小轴压比的情况,桥墩和承台的交界面易发生接缝张开,最终导致直剪破坏;墩底灌浆套筒区域因刚度较大会形成刚域,套筒顶面也会出现较大裂缝;因灌浆套筒直径比连接钢筋

大 3~4 倍,在灌浆套筒中心与纵筋中心一致的情况下,导致纵筋的混凝土保护层厚度相对很大;如果轴压比较大且截面尺寸较小时,套筒上部区域混凝土在偏移率较大的情况下保护层完全剥落后发生受压破坏。

按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)对配置高强钢筋和灌浆套筒的大偏心预制立柱进行裂缝宽度验算时,裂缝宽度大都超过了限值,限制了大直径高强钢筋在预制立柱中的应用。轨道交通高架桥梁下部结构相比城市高架桥梁有显著不同:存在较大的制动力;列车荷载易引发轨道结构与其下部桥梁结构振动,如果立柱存在裂缝会显著影响结构的耐久性;桥宽较窄,下部承台总体较轻;钢筋应力幅控制较严。针对轨道交通高架桥梁有较大制动力,现有大直径高强钢筋灌浆套筒连接预制立柱在正常使用条件下,柱身裂缝宽度可能超过规范容许限值的特点,建议在现有桥墩预制拼装连接构造的基础上,采用配合中心或周边布置预应力筋的方式使桥墩保持全截面受压,满足水平制动力传力要求和规范关于裂缝宽度的要求,以提高结构的耐久性。

尽管灌浆套筒连接技术在多个国家均得到了比较广泛的应用,但是研究成果主要是灌浆套筒的力学特性,没有考虑预应力对灌浆套筒预制拼装桥墩的影响。本文针对某地铁线路的轨道交通桥墩进行预制拼装施工方案的研究,纵筋采用灌浆套筒连接,采用预应力筋来保证在正常使用最不利荷载组合下不出现拉应力,对同时配置灌浆套筒和预应力筋的墩柱的抗震性能进行评价。

1 试验设计

1.1 试件设计

选取某在建地铁线路高架桥立柱,缩尺过程以首次屈服为控制指标,试验模型的弯矩和足尺模型的首次屈服指标最大误差为 2%。试件按弯曲破坏设计,作动器加载中心至墩底的距离为 3.3 m,沿弱轴加载,加载宽度为 0.56 m,剪跨比为 5.89。试件总体布置见

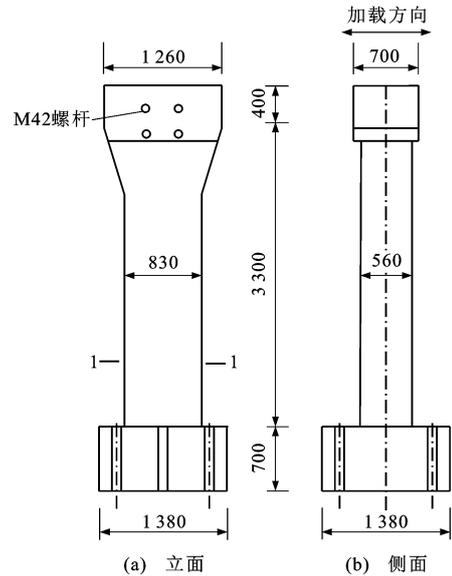


图 1 试件的总体布置(单位:mm)

Fig. 1 General layout of test specimen (unit: mm)

图 1,加载端高度为 0.6 m,试件的总高度为 4.4 m。按照自复位能力来设计预应力筋,期望达到地震下结构的残余位移比较小,减轻地震灾害^[24]。轴压比为 10%,预应力产生的混凝土压应力为 1.9 MPa。

试验包括 3 种不同构造类型的单柱墩。钢筋混凝土(RC)试件为现浇普通钢筋混凝土桥墩试件。预应力钢绞线和灌浆套筒连接的预制拼装(PCSS)试件的构造特点是分别制作承台和预制立柱,承台的主筋位置与立柱的套筒中心位置吻合,拼装施工时,起吊定位立柱节段,接缝处涂抹环氧材料形式胶接缝,承台预留的纵筋插入墩柱预埋的灌浆套筒中,套筒采用压浆机压浆,穿预应力钢绞线,实现预制构件连接,无黏结就是在钢绞线外加一 PVC 保护套,直接安装预应力钢绞线,混凝土浇筑后,强度达到张拉强度即可张拉。精轧螺纹钢筋和灌浆套筒连接的预制拼装(PCTS)试件与 PCSS 试件的区别仅在于以精轧螺纹钢筋替代了预应力钢绞线。

3 种试件具有相同截面尺寸和普通钢筋配筋参数,但是预应力配筋特征不一样。试件的主要配筋指标见表 1。RC 试件的立柱配筋设计见图 2,纵筋选用 $\Phi 20$ mm 的 HRB400 高强钢筋,箍筋和拉筋都

表 1 试件的配筋指标

Tab. 1 Reinforcement indexes of specimens

试件类型	纵筋的配置		塑性铰区箍筋		预应力筋		
	配置	配筋率/%	配置	配箍率/%	配置	配筋率/%	自复位指标
RC	20 $\Phi 20$	1.32	$\Phi 8@50$	1.94			
PCSS	20 $\Phi 20$	1.32	$\Phi 8@50$	1.94	8 $\Phi 15.2$	0.236	1.0
PCTS	20 $\Phi 20$	1.32	$\Phi 8@50$	1.94	4JL25	0.422	1.0

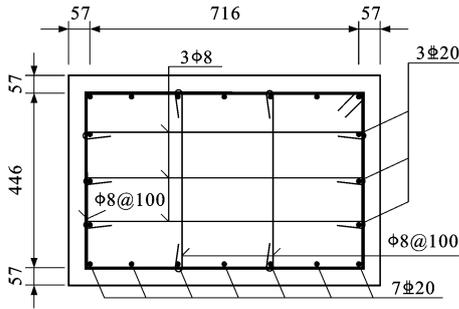


图 2 RC 截面的配筋(单位:mm)

Fig. 2 Reinforcement of RC section (unit: mm)

采用 $\Phi 8$ mm 的普通光圆钢筋,箍筋外净保护层为 39 mm。PCSS 和 PCTS 试件的立柱配筋设计分别见图 3、4,纵筋选用 $\Phi 20$ mm 的 HRB400 高强钢筋,箍筋和拉筋都选用 $\Phi 8$ mm 的普通光圆钢筋,箍筋外净保护层为 16 mm, $\Phi 20$ mm 的 HRB400 纵筋穿过上下接缝,并分别通过灌浆套筒连接。PCSS 试件预应力筋采用 8 根 $\Phi^s 15.2$ 的钢绞线,其抗拉强度标准值为 1 860 MPa,预应力张拉后的永存应力为 798 MPa,钢绞线为无黏结,预应力筋位置见图 3。PCTS 试件预应力筋采用 4 根精轧螺纹钢,位置见图 4,预应力筋设计参数见表 2,参数 γ 和 λ 定义为

$$\gamma = A_p \sigma_{py} / (A_p \sigma_{py} + A_s \sigma_{sy}) \quad (1)$$

$$\lambda = \sigma_p / \sigma_{py} \quad (2)$$

式中: λ 为预应力的张拉程度; γ 为预应力度; σ_p 为

表 2 预应力筋参数

Tab. 2 Parameters of prestressed reinforcements

试件类型	预应力筋类型	数量/根	预应力产生的合力/kN	轴压比/%	单根张拉力/kN	σ_p /MPa	γ /%	λ
PCSS	钢绞线 $\Phi^s 15.2$	8	877	10	110	798	63	0.40
PCTS	精轧螺纹钢 JL25	4	877	10	219	447	58	0.42

1.2 材料特性

采用商品混凝土,混凝土强度等级为 C40。试验采用海螺产 P. II. 52.5 水泥、芜湖申海产中砂、鑫山矿业产粒径 5~25 mm 的碎石、自来水、二级粉煤灰和科之杰 Point-800S 外加剂。混凝土的塌落度为 (80 ± 20) mm。测试力学性能的混凝土与浇筑时的混凝土为同一批次,测试抗压强度的试块是边长为 150 mm 的立方体。测得的 3 个试件 RC、PCSS、PCTS 的混凝土立方体强度分别为 48.6、60.4、62.7 MPa。

测试力学性能所用的钢筋和预应力筋在模型的钢筋下料时取样,测得的主要力学指标见表 3。灌浆料 28 d 抗压强度平均值为 142.0 MPa。

灌浆套筒制作 2 个拉伸试件,破坏模式见图 5,灌浆套筒拉伸试件的破坏位置均为钢筋母材处,而

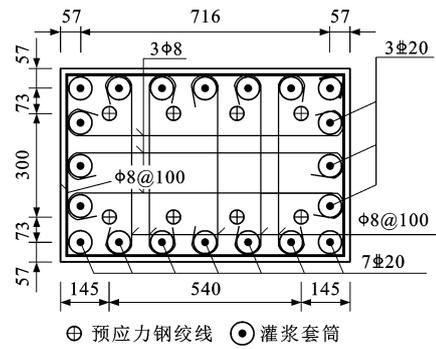


图 3 PCSS 截面的配筋(单位:mm)

Fig. 3 Reinforcement of PCSS section (unit: mm)

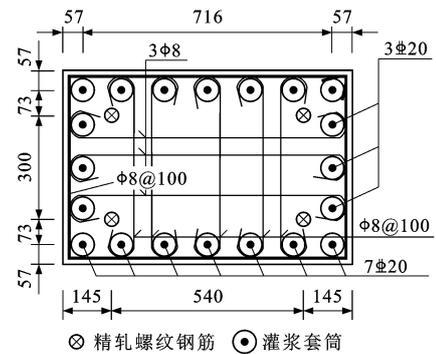


图 4 PCTS 截面的配筋(单位:mm)

Fig. 4 Reinforcement of PCTS section (unit: mm)

预应力筋张拉应力; σ_{py} 为预应力筋屈服应力; A_p 为预应力筋面积; A_s 为普通钢筋的总面积; σ_{sy} 为普通钢筋屈服应力。

表 3 钢筋力学特性

Tab. 3 Mechanical properties of reinforcements

类型	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	延伸率/%
纵筋	20	470	640	22
		465	640	24
箍筋	8	385	495	29
		380	495	32

不是钢筋的拔出破坏,试验结果见表 4。接头的实际拉断强度为钢筋抗拉强度标准值的 1.16 倍。根据国家建筑工程质量监督检验中心的检测报告,该机械接头的单向拉伸试验、高应力反复拉压试验、大变形反复拉压试验所检测的项目均符合中国行业标准《钢筋机械连接技术规程》(JGJ 107—2010)中规定的 I 级型式检验性能要求^[7]。

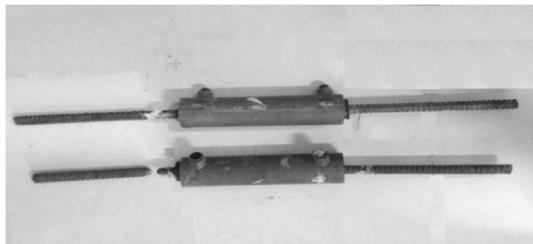


图5 灌浆套筒连接件破坏模式

Fig. 5 Failure mode of grouted sleeve connector

表4 灌浆套筒的拉伸试验结果

Tab. 4 Tensile test results of grouted sleeves

试件序号	破坏荷载/ kN	破坏应力/ MPa	极限强度 标准值/MPa	抗拉强度比
1	196	625	540	1.16
2	196	625	540	1.16

1.3 加载方案

采用上海应用技术大学的10 MN多功能加载系统进行拟静力加载,加载设备见图6。根据原型设计方案计算荷载组合的结果,换算得到模型试验的竖向荷载为1 080 kN。水平荷载分为荷载控制和位移控制2个模式,见图7。荷载控制阶段确定正常运营阶段的裂缝发展规律,按照理论开裂荷载的倍数逐级增大。位移控制阶段确定地震荷载下的位移延性能力,按照等效屈服荷载的倍数逐级增大^[25]。

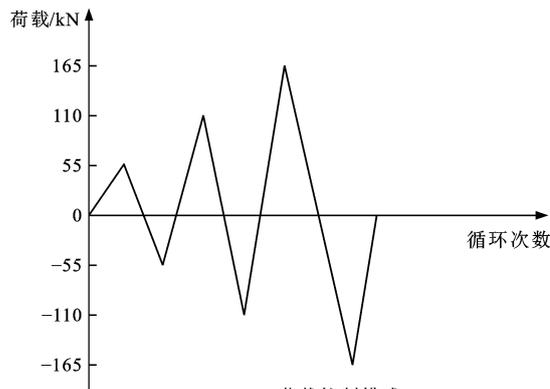


图6 试验加载设备

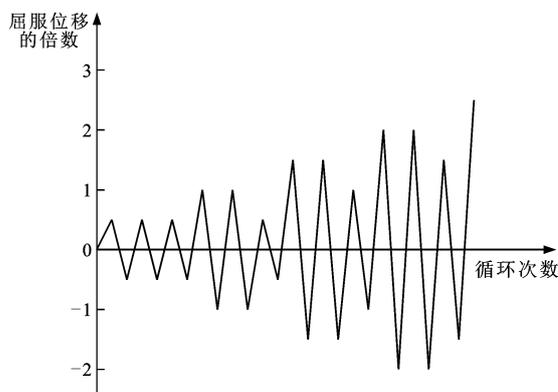
Fig. 6 Experimental loading equipment

2 试验现象描述

试验过程中对各个试件的裂缝位置、宽度、发展过程和钢筋首次屈服及最终破坏形态进行了详细描述^[25]。根据Hose等定义的损伤级别和基于构件层次的五水准性能水平^[26],得到3种试件在整个加载过程中的五水准损伤状态,见图8,其中性能水平I代表出现微小裂缝,性能水平II代表钢筋屈服,性能



(a) 荷载控制模式



(b) 位移控制模式

图7 加载历程

Fig. 7 Loading process

水平III代表塑性铰开始形成,性能水平IV代表塑性铰完全形成,性能水平V代表试件破坏。对图8中各种试件的性能水平I进行比较,可以看出:无黏结预应力可以大幅提高试件的开裂荷载,本设计中采用预应力筋使试件的混凝土轴压力增大1倍,开裂荷载也增大约1倍,提高了试件在运营阶段的使用性能。

RC试件试验完成后清除塑性铰位置处的破碎混凝土,得到最终破坏状态见图9,可以看出:纵筋屈服,封闭箍筋1根断裂,拉筋弯钩变直;破坏区域主要集中在立柱底和承台的交界处,破坏区域高度约为30 cm,即 $0.53B$ (B 为试件沿加载方向截面高度)。

PCSS试件试验完成后清除塑性铰位置处的破碎混凝土,得到最终破坏状态见图10,可以看出:破坏区域高度约为65 cm,即 $1.16B$;破坏区域很高,主要是因为灌浆套筒对传统塑性铰区域的局部增强作用明显,在位移荷载较大的情况下,出现了塑性铰上移,即灌浆套筒上方的钢筋混凝土区域出现了严重的混凝土压碎。

PCTS试件试验完成后清除塑性铰位置处的破碎混凝土,得到最终破坏状态见图11,可以看出:破坏区域高度约为65 cm,即 $1.16B$;因为灌浆套筒对

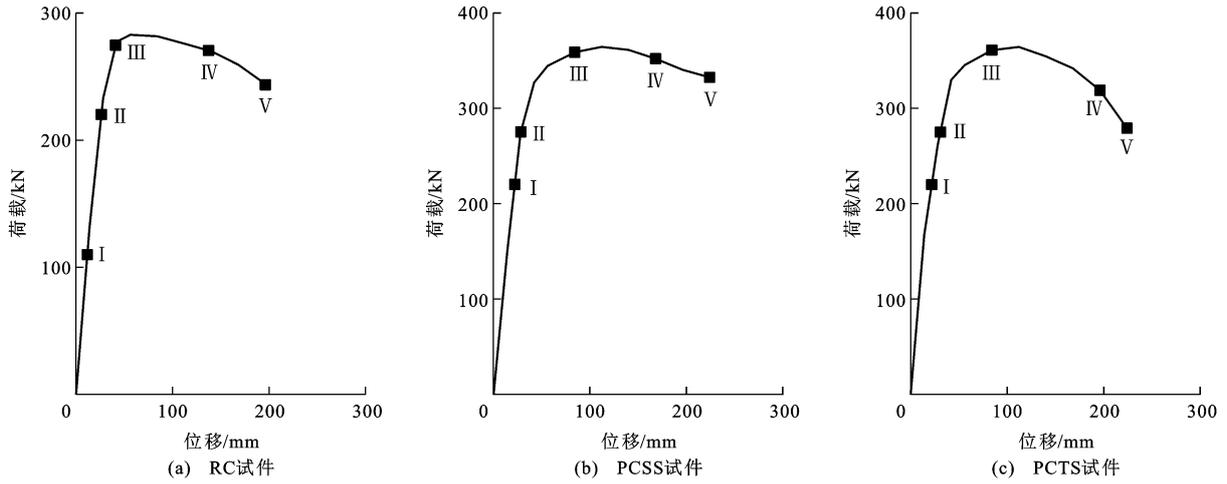


图 8 各种试件的五水准损伤水平

Fig. 8 Five damage level of each kind of specimen

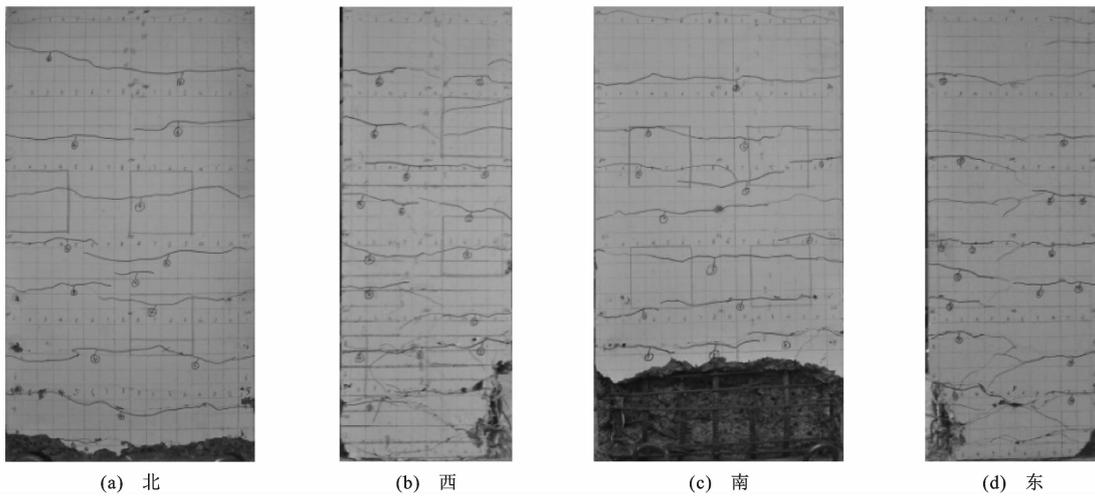


图 9 RC 试件裂缝分布

Fig. 9 Crack distributions of RC specimen

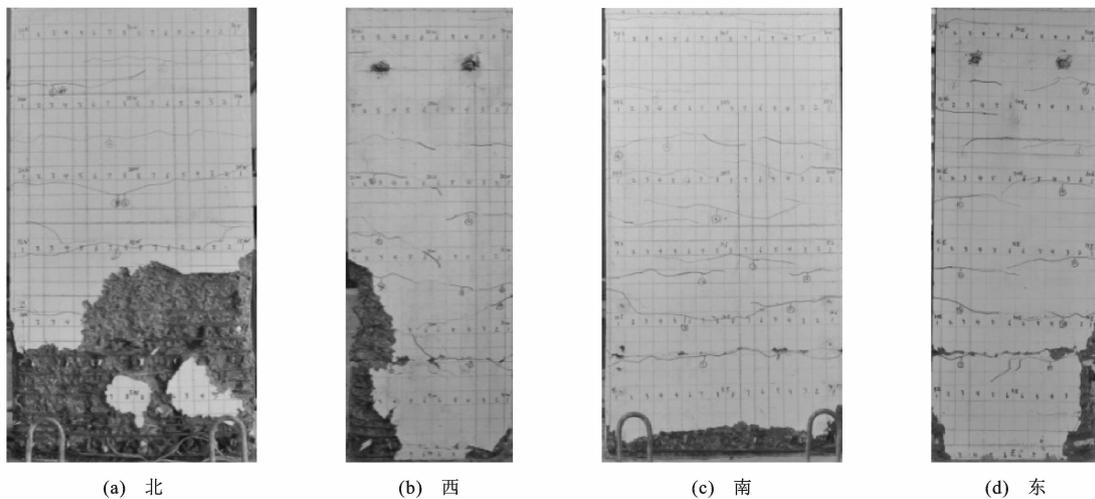


图 10 PCSS 试件裂缝分布

Fig. 10 Crack distributions of PCSS specimen

传统塑性铰区域的局部增强作用出现了塑性铰上移,且灌浆套筒上方钢筋混凝土区域出现了严重的

混凝土压碎。

综上,灌浆套筒的存在增大了传统塑性铰区的

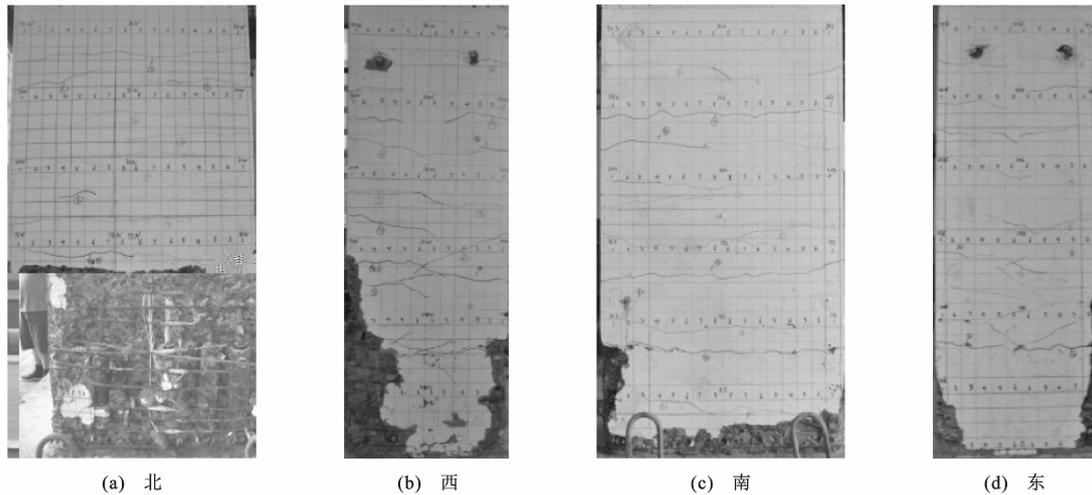


图 11 PCTS 试件裂缝分布

Fig. 11 Crack distributions of PCTS specimen

刚度,使得表层混凝土压碎。破坏区域高度为 65 cm,减去套筒高度 37 cm,约为 28 cm,即 $0.5B$,与传统钢筋混凝土桥墩高度接近,说明灌浆套筒的存在使得传统塑性铰的位置上移了 1 个套筒的高度,相应的箍筋加密区也应在传统范围高度基础上增加 1 个套筒高度。

3 试验结果分析

3.1 水平荷载-位移滞回曲线

在上述加载制度下,得到 3 种试件的实测水平荷载和墩顶位移滞回曲线,如图 12 所示,可知:RC 试件水平最大加载位移约为 196 mm(偏移率为 6%),PCSS 和 PCTS 试件水平最大加载位移约为 224 mm(偏移率为 7%);为便于比较相同偏移率下的结构响应,加载过程中的位移等级增量相同,而且所有试件均加载到水平承载力下降到峰值的 85% 以下;有预应力筋的套筒 PCSS 试件和 PCTS 试件的滞回环形状比较相似。

3.2 水平荷载-位移骨架曲线

桥墩的恢复力特性可通过图 13 的荷载-位移曲

线体现,可以看出:3 种试件的荷载-位移曲线的形状比较接近,表现为首先线性上升,接着进入塑性平台,最后突然下降。

采用通用屈服弯矩法确定屈服点,骨架曲线荷载最大值为极限荷载,定义荷载下降到最大荷载的 85% 对应的位移点为极限位移。各个试件荷载-位移曲线的强度和变形特征数值见表 5,可以看出:PCSS 和 PCTS 试件的各个强度与变形指标非常接近,实测数据正负向均值最大误差为 2.2%,说明通过精心设计,设置钢绞线和精轧螺纹钢筋的拼装桥墩可以取得近乎一致的性能,以 PCSS 试件为例,其屈服荷载和极限荷载正负向均值比 RC 试件的指标分别提高 31% 和 34%,主要原因是预应力筋的作用;等效屈服位移、极限位移和偏移率均值分别比 RC 试件的指标高 17%、13%、13%,主要原因是灌浆套筒和预应力两者的组合作用,特别是灌浆套筒对传统塑性铰区的约束增强作用;虽然屈服位移和极限位移同时升高,但是延性系数有所降低,平均降低 10%。

3.3 初始刚度

从图 13 的荷载-位移曲线可看出:位移加载逐

表 5 强度和变形特征数值

Tab. 5 Characteristic values of strength and deformation

试件类型	加载方向	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	极限荷载与屈服荷载的比值	等效屈服位移/mm	修正极限位移/mm	延性系数	极限偏移率/%
RC	正向	253.5	282.4	1.1	35.2	215.7	6.1	6.5
	负向	-253.2	-282.4	1.1	-35.6	-177.3	5.0	-5.4
PCSS	正向	326.7	364.0	1.1	41.9	224.0	5.3	6.8
	负向	-340.3	-397.4	1.2	-40.7	-219.6	5.4	-6.7
PCTS	正向	323.1	364.3	1.1	40.6	207.2	5.1	6.3
	负向	-341.9	-394.7	1.2	-43.2	-226.3	5.2	-6.9

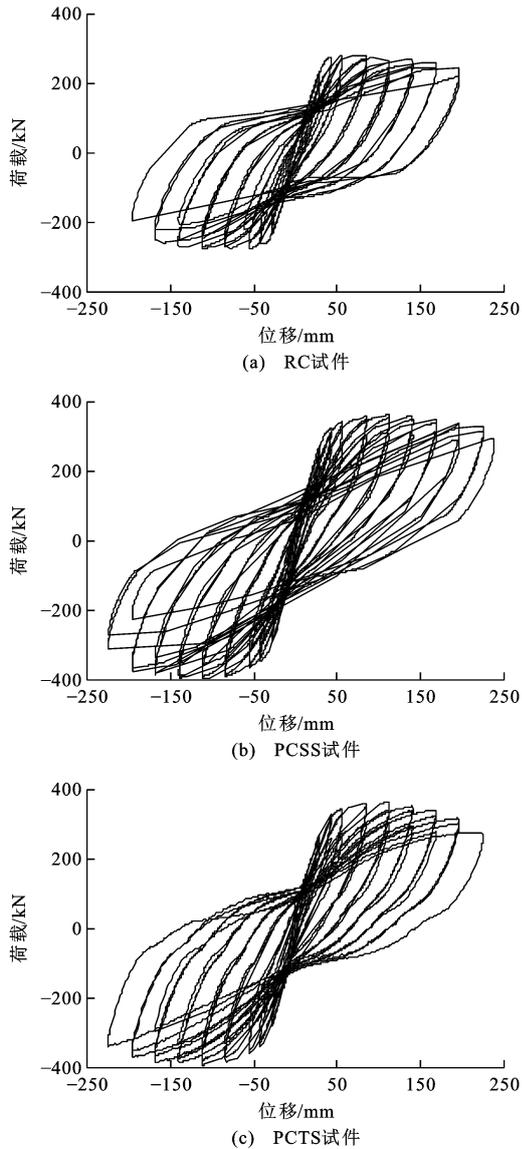


图 12 荷载-位移滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis curves of load-displacement

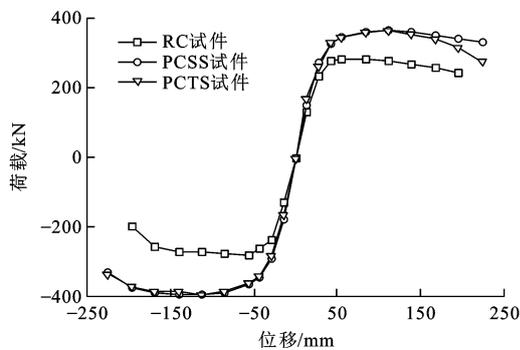


图 13 荷载-位移曲线

Fig. 13 Curves of load-displacement

级增大时,原有裂缝继续发展,新裂缝慢慢出现,导致刚度明显退化。因为保护层混凝土剥落和核心混凝土压碎会使部分混凝土不参与受力,导致有效截

面面积减小。定义初始刚度为荷载-位移曲线原点处的切线斜率,该指标反映了 3 种试件在弹性阶段的不同。3 种试件的初始刚度见表 6,可以看出:PCSS 和 PCTS 试件都是具有灌浆套筒的预应力试件,刚度增加较大,与 RC 试件相比分别提高 13%和 27%,因为灌浆套筒直径较大且套筒很长,刚度增加明显。

表 6 试件初始刚度

Tab. 6 Initial stiffnesses of specimens

试件类型	RC	PCSS	PCTS
初始刚度/(kN · mm ⁻¹)	9.4	10.6	11.9
按照 RC 归一化	1.00	1.13	1.27

3.4 耗能能力

图 14 是各个试件的峰值位移对应的耗能能力曲线,在偏移率达到 5%之前,3 种试件的耗能能力接近,偏移率达到 5%之后耗能能力出现了差异。

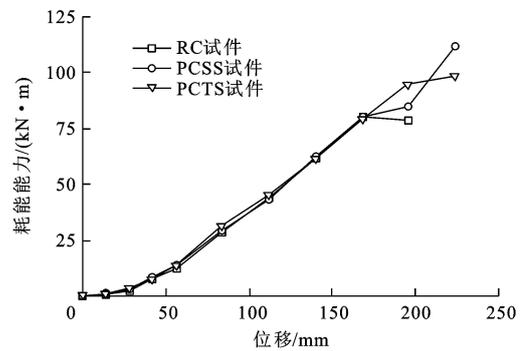


图 14 耗能能力曲线

Fig. 14 Curves of energy dissipation capacity

图 15 为 3 种试件的等效黏滞阻尼比曲线,可见:随着加载进行,等效黏滞阻尼比呈不断增加的趋势,说明随着结构的开裂或者压碎,钢筋的耗能在增加;PCSS 试件和 PCTS 试件的耗能机制基本相同,所以两者的等效黏滞阻尼比曲线趋势比较一致,初始阻尼比约为 0.08,最大阻尼比达到 0.22 左右,相

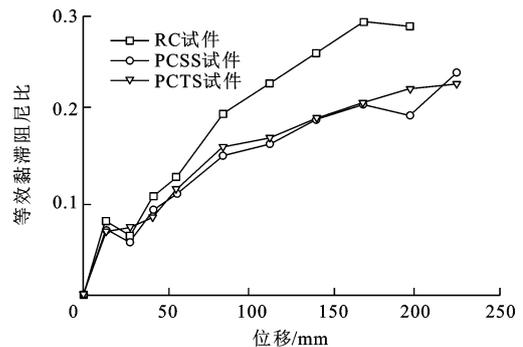


图 15 等效黏滞阻尼比曲线

Fig. 15 Equivalent viscous damping ratio curves

同拟静力位移下的阻尼比小于 RC 试件。

3.5 残余位移

试件的拟静力残余位移随加载位移等级增加时的变化情况见图 16,可见:在加载位移等级没有达到 40 mm(偏移率为 1.2%)时,RC 试件的拟静力残余位移可忽略不计,具有自复位能力;位移等级大于 40 mm 时,构件进入塑性状态,拟静力残余位移逐渐增大,慢慢失去自复位能力;在最大水平位移为 196 mm(偏移率为 6%)的情况下,RC 试件的最大拟静力残余位移达到 -157 mm(偏移率为 4.8%),在量级上残余位移与加载位移相近;有预应力的灌浆套筒试件 PCSS 和 PCTS 的拟静力残余位移变化趋势与 RC 试件相同,在相同最大加载等级 196 mm(偏移率为 6%)下,正负向拟静力残余位移均值为 RC 试件的 61%和 74%,表明具有无黏结预应力筋的试件自复位能力良好,无黏结预应力筋 PCSS 试件的效果优于精轧螺纹钢筋 PCTS 试件。

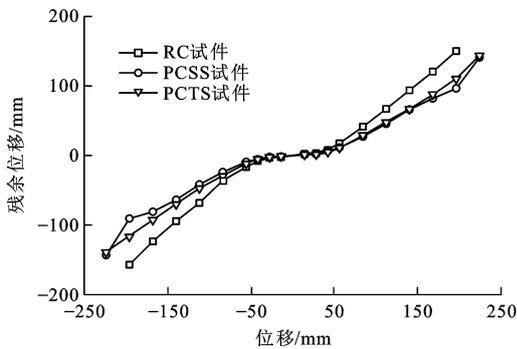


图 16 拟静力残余位移曲线

Fig. 16 Curves of pseudo-static residual displacement

3.6 预应力筋状态

与已有研究相比,本文在常规灌浆套筒的基础上增加了预应力筋,因此,需要重点关注预应力筋的响应特征。理想状态下,在整个加载阶段预应力筋要保持弹性,从而使桥墩具有较强的自复位能力。PCSS 试件的单根预应力为 120 kN,加载过程中,采用压力传感器测到的受拉、受压侧预应力筋随加载过程的预应力变化曲线见图 17,可以看出:当墩柱保持弹性时,预应力筋的应变在回到平衡位置时也能恢复到初始应变;2 根预应力筋的预应力区间分别为 [95, 210]、[88, 225] kN,与初始值 120 kN 对比,变化率范围为 [80%, 175%]和 [73%, 188%],说明加载过程中,预应力筋的预应力变化范围很大,受拉侧的预应力筋伸长,最大预应力增量达到 88%,受压侧预应力筋缩短,最大预应力损失达到 27%;单根预应力钢绞线的屈服张拉力为 232 kN,极限张拉力为

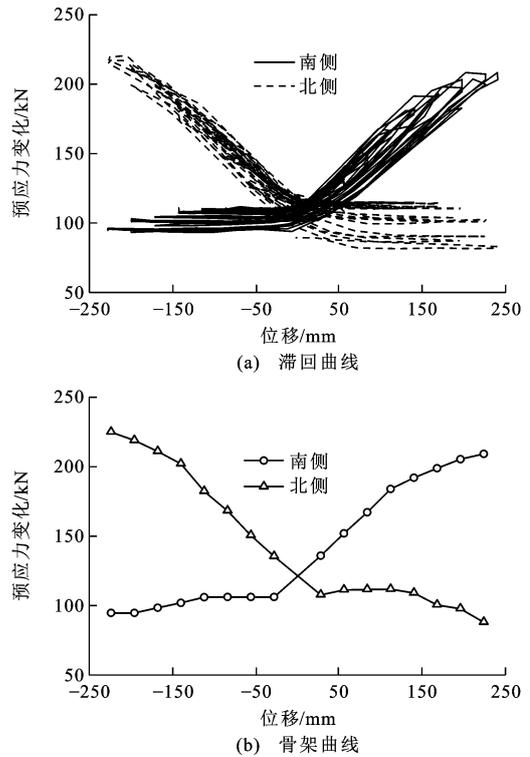


图 17 PCSS 试件的预应力变化曲线

Fig. 17 Prestress changing curves of PCSS specimen

255 kN;实际加载过程中最大张拉力为 225 kN,预应力钢绞线保持弹性,但是接近屈服极限,达到设计预期。

对于 PCSS 试件,采用应变片测量加载过程中预应力筋钢绞线应变的变化。典型的受拉、受压侧预应力筋应变曲线见图 18,可以看出:南侧与北侧应变的变化区间分别为 $[-600, 4 200] \times 10^{-6}$ 和 $[-500, 3 200] \times 10^{-6}$,换算成预应力的增量变化范围分别为 $[-16, 115]$ 、 $[-14, 88]$ kN;采用压力传感器测量得到的预应力增量变化范围为 $[-32, 105]$ 、 $[-25, 90]$ kN,两者在量级上接近;由于预应力钢绞线的测量时应变片不是沿着钢绞线轴线粘贴,而是沿着螺旋上升的钢丝粘贴,预应力钢绞线的应变测量结果存在较大误差,仅供参考。

对于 PCTS 试件,采用应变片测量加载过程中精轧螺纹钢筋的应变变化。典型的受拉、受压侧应变曲线见图 19,可以看出:PCTS 试件南侧与北侧应变变化区间分别为 $[-800, 4 022] \times 10^{-6}$ 和 $[-1 200, 4 000] \times 10^{-6}$,换算成预应力增量变化范围为 $[-78, 393]$ 、 $[-117, 391]$ kN,初始预应力为 219 kN,实际预应力的变化范围为 $[141, 612]$ 、 $[102, 610]$ kN;直径 25 mm 的精轧螺纹钢筋的等效屈服荷载为 610 kN,极限荷载为 655 kN,说明在整个加载过程中预应力精轧螺纹钢筋基本保持弹性,

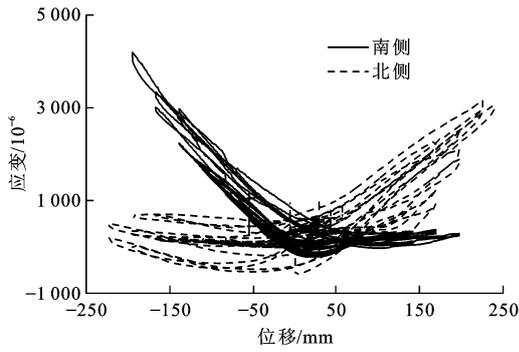


图 18 PCSS 预应力筋应变曲线

Fig. 18 Strain curves of prestressed reinforcements of PCSS specimen

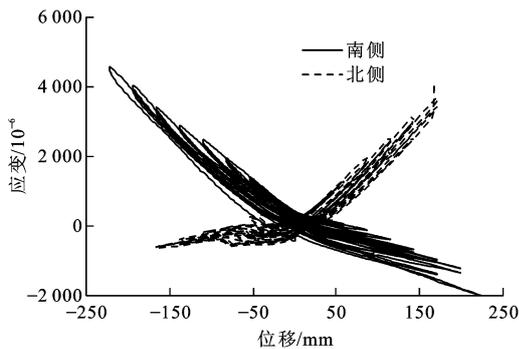


图 19 PCTS 中预应力筋应变曲线

Fig. 19 Strain curves of prestressed reinforcements of PCTS specimen

在达到最大位移加载等级时,才开始进入屈服状态。

4 结 语

(1)无黏结预应力可以大幅提高试件的开裂荷载。在采用预应力筋使混凝土预压应力增加 1 倍的情况下,开裂荷载也接近增加 1 倍,提高了桥墩在运营期间的使用性能。

(2)加载中灌浆套筒最大应变增量约为 $1\ 000 \times 10^{-6}$ 。灌浆套筒可以增加传统塑性铰区混凝土的约束,套筒区域类似形成刚域,增大了截面的刚度,导致传统塑性铰位置上移,在除灌浆套筒区域以外弯矩最大的地方形成塑性铰。灌浆套筒的存在使得塑性铰上移了 1 个套筒的高度,相应的箍筋加密区也应在传统高度范围基础上增加 1 个套筒高度。

(3)PCSS 和 PCTS 试件的各个强度变形指标非常接近,实测数据正负向均值最大误差为 2.2%。以 PCSS 试件为例,其屈服荷载和极限荷载正负向均值比 RC 试件的指标分别提高 31%和 34%;等效屈服位移、极限位移和偏移率均值分别比 RC 试件提高 17%、13%、13%。虽然屈服位移和极限位移同时升高,但是延性系数平均降低 10%。

(4)在相同最大加载等级 196 mm(偏移率为 6%)下,正负向拟静力残余位移均值为 RC 试件的 61%和 74%,这 2 种节段拼装桥墩都显示出较好的自复位性能。经过精心设计,预应力在整个受力阶段没有进入屈服阶段,达到期望要求。

(5)比较有预应力的灌浆套筒 PCSS 和 PCTS 试件,两者的抗震性能非常接近。精轧螺纹钢筋和钢绞线 2 种预应力方式中,精轧螺纹钢筋不能适应弯曲的管道,钢绞线可以适当弯曲,且钢绞线可以成束,面积调整灵活。无黏结预应力筋和灌浆套筒拼接的桥墩试件具有正常使用性能和抗震性能最佳,施工经验丰富的优点,但也存在对工人技术水平要求高、造价高等缺点,可作为预制拼装轨道桥墩的推荐方案。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 林上顺,黄卿维,陈宝春,等. 跨海大桥 U-RC 组合桥墩设计[J]. 交通运输工程学报,2017,17(4):55-65.
LIN Shang-shun, HUANG Qing-wei, CHEN Bao-chun, et al. Design of U-RC composite pier of sea-crossing bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 55-65. (in Chinese)
- [2] 黄国斌,查义强. 上海公路桥梁桥墩预制拼装建造技术[J]. 上海公路,2014(4):1-5.
HUANG Guo-bin, ZHA Yi-qiang. The construction technique of prefabricated and assembled highway bridge piers in Shanghai[J]. Shanghai Highways, 2014(4): 1-5. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] YEE A A, ENG H D. Structural and economic benefits of precast/prestressed concrete construction[J]. PCI Journal, 2001, 46(4): 34-42.
- [5] 韩超,郑毅敏,赵勇. 钢筋套筒灌浆连接技术研究与应用进展[J]. 施工技术,2013,42(21):113-117.
HAN Chao, ZHENG Yi-min, ZHAO Yong. Research and application development of grout sleeve splicing for reinforcement[J]. Construction Technology, 2013, 42(21): 113-117. (in Chinese)
- [6] 吴涛,刘全威,成然,等. 钢筋套筒灌浆连接性能试验研究及筒壁应力分析[J]. 工程力学,2017,34(10):68-75.
WU Tao, LIU Quan-wei, CHENG Ran, et al. Experimental study and stress analysis of mechanical performance of grouted sleeve splice[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10): 68-75. (in Chinese)
- [7] 黄远,朱正庚,黄登,等. 钢筋半套筒灌浆连接的静力拉伸试验研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2016,44(2):

- 26-32.
- HUANG Yuan, ZHU Zheng-geng, HUANG Deng, et al. Investigation into half grout sleeve splicing for rebars via static tensile test[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2016, 44(2): 26-32. (in Chinese)
- [8] LING J H, RAHMAN A B A, IBRAHIM I S, et al. Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 33: 90-98.
- [9] KIM Y. A study of pipe splice sleeves for use in precast beam-column connections[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2000.
- [10] 陈项南. 新型灌浆变形钢套筒连接技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- CHEN Xiang-nan. Study on a new-type grouted deformed pipe splice[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [11] 郑永峰. GDPS 灌浆套筒钢筋连接技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- ZHENG Yong-feng. Research on rebar splicing system by GDPS grout-filled coupling sleeve[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [12] SAYADI A A, RAHMAN A B A, SAYADI A, et al. Effective of elastic and inelastic zone on behavior of glass fiber reinforced polymer splice sleeve[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 80: 38-47.
- [13] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction[J]. *Engineering Structures*, 2015, 83: 154-162.
- [14] 刘洪涛, 闫秋实, 杜修力. 钢筋混凝土框架梁柱节点灌浆套筒连接抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(9): 54-61.
- LIU Hong-tao, YAN Qiu-shi, DU Xiu-li. Study of seismic performance of reinforced concrete frame beam-column joints connected with grouted sleeves[J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(9): 54-61. (in Chinese)
- [15] 赵 勇, 李 锐, 王晓锋, 等. 大直径高强钢筋套筒灌浆连接预制柱抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(5): 27-35, 71.
- ZHAO Yong, LI Rui, WANG Xiao-feng, et al. Experimental research on seismic behaviors of precast concrete columns with large-diameter and high-yield strength reinforcements splicing by grout-filled coupling sleeves [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(5): 27-35, 71. (in Chinese)
- [16] 魏红一, 肖 纬, 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 Hong-yi, XIAO Wei, WANG Zhi-qiang, 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)
- [17] 张 臻. 高层钢筋混凝土结构中预制拼装柱的抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- ZHANG Zhen. Seismic performance research of precast concrete columns in high-rise buildings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [18] 章一萍, 冯 波, 熊 峰, 等. 套筒灌浆连接纵筋的预制钢筋混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2015, 45(15): 81-86.
- ZHANG Yi-ping, FENG Bo, XIONG Feng, et al. Experimental study on seismic behavior of precast reinforced concrete short columns with grouted sleeves connecting longitudinal reinforcements[J]. *Building Structure*, 2015, 45(15): 81-86. (in Chinese)
- [19] PANTELIDES C P, AMELI M J, REAVELEY L D. Evaluation of grouted splice sleeve connections for precast reinforced concrete bridge piers[R]. Fargo: Mountain-Plains Consortium, 2017.
- [20] 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.
- [21] TAZARV M, SAIIDI M S. Seismic design of bridge columns incorporating mechanical bar splices in plastic hinge regions[J]. *Engineering Structures*, 2016, 124: 507-520.
- [22] 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 Zhi-qiang, WEI Zhang-zhen, WEI Hong-yi, 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)
- [23] 李 锐, 郑毅敏, 赵 勇. 配置 500 MPa 钢筋套筒灌浆连接预制混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(5): 255-263.
- LI Rui, ZHENG Yi-min, ZHAO Yong. Experimental research on seismic performance of precast concrete columns with 500 MPa reinforcements splicing by grout-filled coupling sleeves[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(5): 255-263. (in Chinese)
- [24] BU Zhan-yu, OU Yu-chen, SONG Jian-wei, et al. Cyclic loading test of unbounded and bonded posttensioned precast segmental bridge columns with circular section[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(2): 1-17.
- [25] 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 Ji-ping, YAN Xing-fei, WANG Zhi-qiang. 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)
- [26] HOSE Y, SILVA P, SEIBL F. Development of a performance evaluation database for concrete bridge components and systems under simulated seismic loads[J]. *Earthquake Spectra*, 2000, 16(2): 413-442.