

预制拼装混凝土双柱墩抗震性能试验

李航¹, 刘朵^{2,3}, 熊英倩¹, 张建东^{1,2}

(1. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 在役长大桥梁安全与健康国家重点实验室, 江苏 南京 211112; 3. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要 目的 研究预制混凝土双柱墩的抗震性能, 为该类桥墩抗震设计及工程应用提供参考。方法 开展预制装配式双柱墩和现浇双柱墩往复加载试验, 观察试验过程中两者的裂缝开展和破坏形态, 并对滞回曲线、残余位移、刚度、累计耗能和延性等参数进行对比。结果 与现浇墩底部裂缝较为均匀的状况相比, 预制双柱墩墩底灌浆套筒位置接缝张开较为明显, 预制双柱墩与现浇双柱墩滞回曲线均较为饱满, 具有良好耗能能力; 预制双柱墩峰值承载力和极限位移分别为现浇墩对应值的 91.6% 和 88.4%, 总体耗能性能稍弱于现浇双柱墩。结论 预制混凝土双柱墩抗震性能指标与现浇双柱墩相比, 差值均为 10% 左右, 没有明显差异; 预制混凝土双柱墩具有良好的整体性和抗震性能。

关键词 预制混凝土双柱墩; 抗震性能; 往复荷载; 滞回曲线; 峰值承载力

中图分类号 TU 352.1; U443.22

文献标志码 A

Experimental Study on Seismic Performance of Precast Double Column Piers

LI Hang¹, LIU Duo^{2,3}, XIONG Yingqian¹, ZHANG Jiandong^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, China, 211816; 2. The State Key Laboratory on Safety and Health of In-service Long-span Bridges, Nanjing, China, 211112; 3. Jiangsu Transportation Institute Group Co. Ltd., Nanjing, China, 210019)

Abstract: In order to provide reference for seismic design and engineering application of the precast double column pier, the seismic performance of this type of pier was studied. Tests of cast-in-place double column pier and precast double column pier models under cyclic load were carried out. Through experiments, the crack development and failure mode of piers during loading were observed, and the force-displacement curve, residual displacement, stiffness, cumulative energy consumption and ductility were compared. The results show that the joints of the grouting sleeve at

收稿日期: 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51908283); 交通运输行业重点科技项目(2019-MS1-018); 青海省重点研发与转化计划项目(2019-SF-127); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX22_1323)

作者简介: 李航(1996—), 女, 博士研究生, 主要从事桥梁结构的抗震防灾等方面研究。

the bottom of the precast double column pier are obviously open, and the cracks at the bottom of the cast-in-place pier are more uniform than that at the bottom of the cast-in-place pier. The hysteretic curves of precast double column pier and cast-in-place double column pier are full and have good energy absorption capacity. The peak force and ultimate displacement of precast double column pier are 91.61% and 88.43% of that of cast-in-place pier respectively. The overall energy consumption performance of precast double column pier is slightly weaker than that of cast-in-place pier. Compared with cast-in-place double column pier, the difference of seismic performance index of precast double column pier is not significant, for which is within 10%. Precast double column pier has good integrity and seismic performance.

Key words: precast double column pier; seismic performance; cyclic load; hysteresis curve; peak force

自20世纪90年代,为加快工程建设进度、提高施工质量以及减少环境干扰,预制装配建造技术已成为桥梁建设的研究热点^[1]。当前我国桥梁上部结构的预制装配技术应用广泛、发展较为成熟,但桥梁下部结构的装配化设计和施工技术仍需进一步研究。预制拼装桥墩由于其整体性稍弱于现浇桥墩,若要在实际工程中推广下部结构预制拼装建造技术,需要对其抗震性和耐久性进行深入研究^[2-3]。

针对灌浆套筒连接的预制装配桥墩的抗震性能,学者们开展大量研究并得到了丰富成果。张兴虎^[4]、Z. B. Haber^[5]、M. Tazarfi^[6]、卢干^[7]和Z. Q. Wang等^[8]通过试验研究、数值模拟和理论分析等方法探究了灌浆套筒预制装配桥墩抗震性能。李锐等^[9-10]对配置高强钢筋的灌浆套筒预制墩柱进行低周反复加载试验,结果表明,高强钢筋灌浆套筒连接预制柱的位移延性、耗能能力和承载力均与现浇柱相近。王志强等^[11]研究了灌浆套筒连接预制桥墩抗剪性能,结果表明,预制试件的抗剪性能与现浇试件相近。Y. Q. Liu等^[12]进行了足尺灌浆套筒预制墩柱试验,结果表明,预制墩柱具有相当的侧向变形能力和延性,但承载能力稍低。上述研究成果主要集中在预制单柱墩的性能,且灌浆套筒多用于墩柱和承台之间连接。

随着双柱墩和多柱墩也逐步应用在新建

桥梁和旧桥改造工程中,其抗震性能也得到关注,但相关研究仍处于初步探索阶段^[13-20]。葛继平等^[13-14]设计了现浇和波纹管连接双柱墩试件并进行了单向和双向拟静力加载试验,结果表明,预制装配桥墩的整体性与现浇墩相近。H. Y. Qu等^[15]进行了缩尺框架墩拟静力往复试验,墩柱的墩身与盖梁和承台之间采用不同的连接方式,试验表明,墩柱结构体系的不同会造成墩柱抗震性能的差异。高飞^[16]进行了带梁系预制拼装双柱墩抗震性能的有限元分析,分析得到提高轴压比及预应力度有利于提高预制拼装双柱墩的抗震性能,但会削弱双柱墩延性。

由于预制装配式双柱墩同时存在墩身与承台和墩身与盖梁之间预制连接,连接构造和受力特性较单柱墩复杂。因此,笔者开展预制双柱墩和现浇双柱墩往复加载试验,观察两者加载过程中的裂缝开展和破坏形态,对比现浇和预制双柱墩的滞回曲线、骨架曲线、累积耗能、残余位移、刚度和位移延性系数等数据,进而分析预制装配式双柱墩的抗震性能,为其抗震设计提供依据。

1 试验

1.1 试件设计

以某高速公路高架桥预制装配式双柱墩为例,为了真实准确分析装配式双柱墩的抗震性能,综合考虑加工、运输和实验室加载条

件,试验双柱墩试件按 1:5 比例进行缩尺设计。现浇和预制双柱墩的模型尺寸保持一致,如图 1 所示。桥墩承台长×宽×高为 3 500 mm×900 mm×600 mm,盖梁长×宽×高为 3 400 mm×600 mm×500 mm,墩身截面长×宽为 400 mm×400 mm,墩高为 1 800 mm。墩柱、承台、盖梁所用混凝土按照国家标准测试,测得轴心抗压强度标准值

为 47.5 MPa。预制双柱墩试件的墩身、盖梁和承台分别预制,墩身与盖梁通过灌浆波纹管连接,墩顶纵筋完全伸入盖梁内。墩身与承台通过灌浆套筒连接,套筒置于墩柱底部。盖梁连接波纹管直径为 60 mm,墩底灌浆套筒直径为 40 mm,长为 370 mm。现浇双柱墩试件为混凝土一次性浇筑而成。

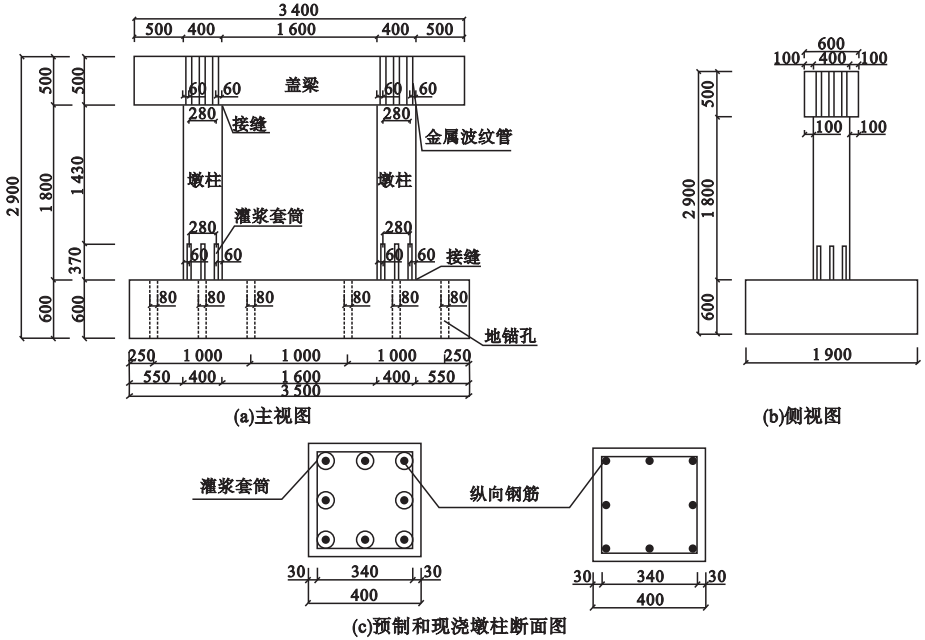


图 1 双柱墩试件构造示意图

Fig. 1 The structure diagram of pier specimen

预制和现浇双墩柱配筋情况一致,如图 2 所示。墩身纵筋选用 $\Phi 18$, 配筋率为 1.27%; 箍筋选用 $\Phi 10$, 非加密区配箍率为

0.32%, 加密区配箍率为 1.28%。盖梁纵筋为 $\Phi 20$, 箍筋为 $\Phi 12$, 所用钢筋均为 HRB400。

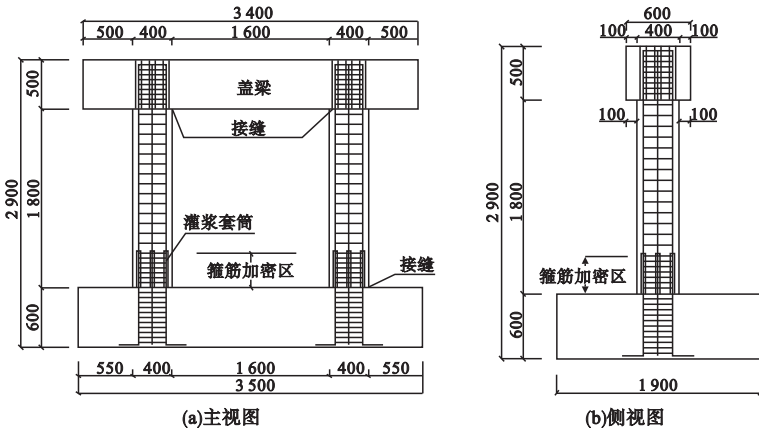


图 2 预制双柱墩试件墩柱配筋图

Fig. 2 The reinforcement drawing of precast pier specimen

1.2 加载装置及加载方案

采用100 t的液压伺服器进行水平往复荷载,通过液压千斤顶施加竖向轴力模拟桥梁上部结构自重,单个墩柱的轴压比取10%,水平往复位移荷载通过MTS作动器中心(最大行程 ± 250 mm)施加,保证MTS中心与墩帽中心等高且保持水平,试验加载装置如图3所示。试验水平加载采用位移加载方式,各级位移均循环三次。加载幅值依次为4 mm、6 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm,之后以10 mm增量增加,当荷载降至最大荷载的85%时停止加载。

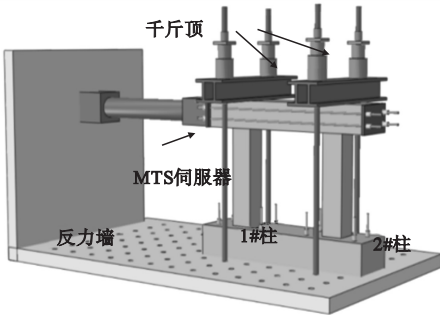


图3 加载装置示意图

Fig. 3 The loading device

2 试验结果分析

2.1 破坏形态

预制双柱墩在初期加载水平位移至6 mm时,墩柱开始出现裂缝,分别集中在靠

近加载端(1#柱)墩柱墩顶和远离加载端(2#柱)墩底处(见图4(a)和(b));当加载至15 mm时,1#柱裂缝延展,2#柱墩顶灌浆料少量局部破碎,墩底灌浆垫层受拉开裂(见图4(c)和(d));随着不断加载,双柱墩墩身的裂缝不断开展,当加载至50 mm时,1#柱裂缝数量不再增加,宽度变大,墩顶出现混凝土剥落现象,墩底接缝张开已达7 mm(见图4(e)和(f));加载至70 mm时,1#柱墩顶混凝土竖向剥落,剥落高度约为320 mm,2#柱混凝土斜向剥落,高度约为300 mm,最终达到破坏,破坏形态如图4(e)所示。

与预制双柱墩相比,现浇双柱墩在加载位移为4 mm时,墩身有裂缝产生,主要集中在1#柱墩顶,裂缝出现位移小于预制墩柱(见图5(a));当加载位移为20 mm时,1#柱和2#柱形成多条裂缝,2#柱墩顶处产生交叉的斜裂缝(见图5(b));当加载位移为25 mm时,1#柱裂缝增加,2#柱墩顶产生交叉的斜裂缝,盖梁上也形成了3条竖向裂缝(见图5(c)和(d));当加载位移为50 mm时,墩柱裂缝随着荷载的增大不断延伸,数量增多,宽度变大,墩柱顶端混凝土出现剥落趋势(见图5(e)和(f));在加载位移为80 mm时,1#柱和2#柱墩底混凝土压碎,压碎高度约为200 mm,破坏形态如图5(g)所示。

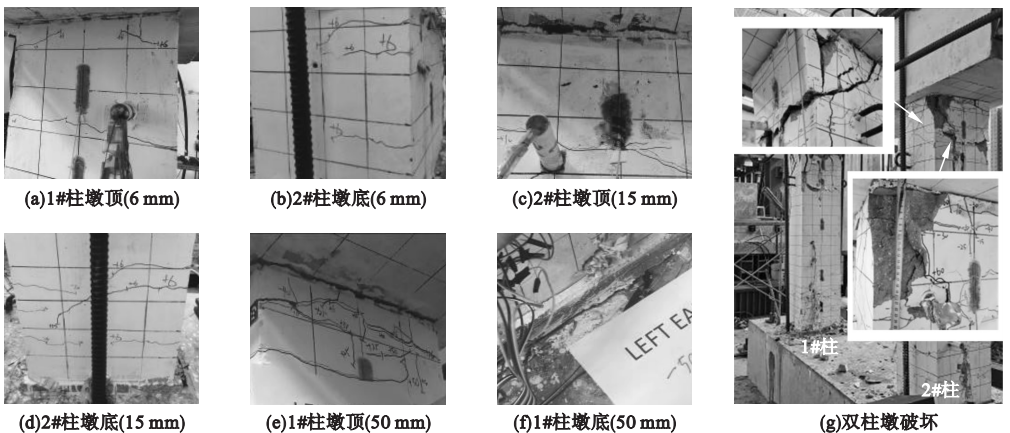


图4 预制双柱墩破坏形态和裂缝开展图

Fig. 4 The crack and failure mode of precast pier

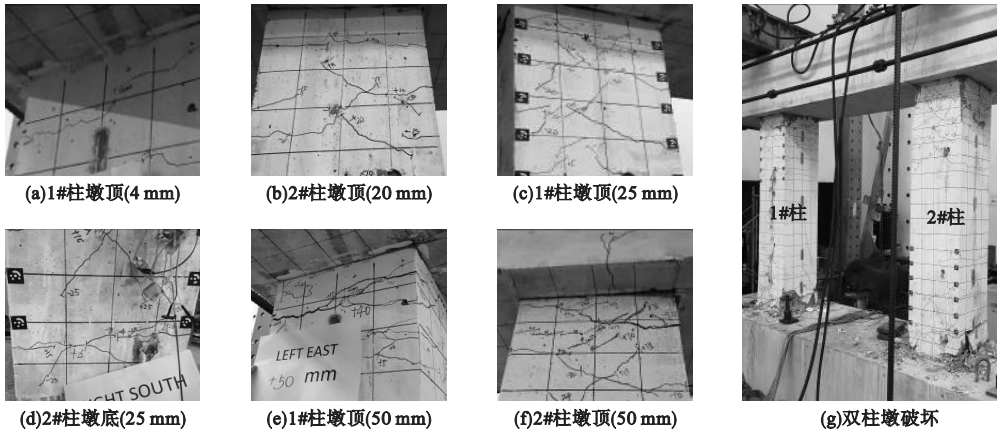


图5 现浇双柱墩破坏形态和裂缝开展图

Fig. 5 The crack and failure mode of cast-in-place pier

现浇双柱墩最早出现裂缝位移比预制墩小,但破坏位移和荷载微大于预制墩柱。破坏时,预制墩柱混凝土压溃剥落集中在墩顶位置,墩底破坏位于接缝处;而现浇墩柱裂缝分布于墩顶和墩底,墩底的破坏范围比墩顶大,主要由于预制双柱墩的墩底套筒提高了该区域的强度。现浇双柱墩的承载能力和延性略好,但两者相差不明显。

2.2 荷载和位移关系

图6(a)为预制双柱墩和现浇双柱墩的滞回曲线。由图可知,在加载前期预制双柱墩与现浇双柱墩的曲线几乎重叠保持一致。随着进一步加载,预制双柱墩先达到峰值点,且峰值荷载小于现浇墩。在构件破坏时,现浇双柱墩的极限位移要大于预制墩。总体看,现

浇双柱墩和预制双柱墩的滞回曲线均较为饱满,具有良好的吸能能力,但现浇双柱墩的滞回曲线仍比预制墩的滞回曲线略饱满。

将各滞回环峰值点依次相连得到双柱墩骨架曲线如图6(b)所示。图中,预制双柱墩初期的刚度和现浇墩相近,在达到峰值荷载后,预制双柱墩的刚度退化快于现浇墩。表明预制双柱墩地震响应大,损伤程度比现浇试件严重。根据表1中特征点计算值,预制双柱墩的屈服承载力、峰值承载力和极限承载力分别为现浇墩时应值的93.8%、91.6%和91.6%,屈服位移、峰值位移和极限位移分别为现浇墩时应值的84.2%、84.2%、88.4%,承载能力和延性仅稍弱于现浇双柱墩,两者没有明显差异。

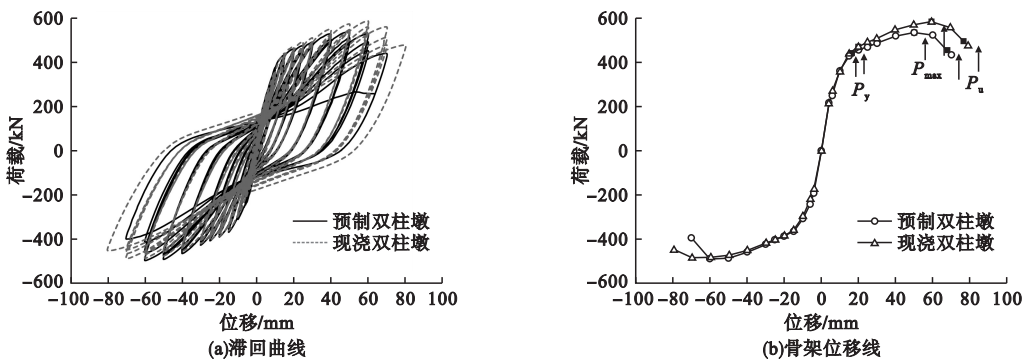


图6 双柱墩荷载-位移曲线

Fig. 6 The force-displacement curve of pier and corresponding skeleton curve

表1 双柱墩荷载-位移曲线特征点

Table 1 Characteristic points of force-displacement curve of piers

试件类型	钢筋屈服		最大荷载		极限破坏		延性系数 μ
	F_y /kN	Δ_y /mm	F_{max} /kN	Δ_{max} /mm	F_u /kN	Δ_u /mm	
预制墩	441.8	16.5	535.1	50.1	454.8	68.0	4.1
现浇墩	471.1	19.9	584.1	59.5	496.5	76.9	3.9

注: F_y, F_{max}, F_u 分别为钢筋的屈服荷载、最大荷载、极限破坏时荷载; $\Delta_y, \Delta_{max}, \Delta_u$ 分别为钢筋的屈服位移,最大荷载时位移,极限破坏时位移。

2.3 耗能特性

双柱墩的耗能性能可由每个位移下的单圈滞回耗能和累积滞回耗能进行评价。计算每组荷载下的滞回环面积,得到该位移水平下耗能情况,图7(a)为预制和现浇双柱墩的单圈耗能对比。由图可知,在整个加载过程中预制和现浇双柱墩的单圈累积耗能差距微弱。在加载位移为50 mm时,预制双柱墩达到峰值荷载,桥墩损伤严重,单圈耗散能量性能开始低于现浇构件,且后续耗能能力不足。

图7(b)为预制和现浇双柱墩累积滞回耗能对比,累积滞回耗能为结构从开始加载直至破坏所耗散的能量,即滞回环包围的面积之和。由图可知,二者的累积耗能在全加载过程中相差很小。初期加载时,结构处于弹性阶段和轻微损伤阶段,二者的耗能均很小且无偏差。由于预制桥墩早于现浇桥墩退出工作,直至构件破坏累积耗散能量比现浇桥墩对应值减少了28.8%。

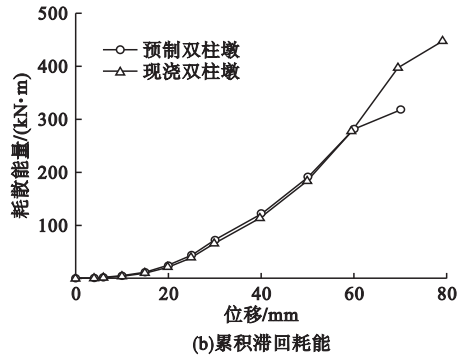
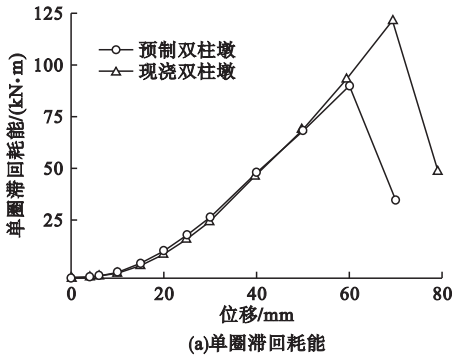


图7 双柱墩耗能特性

Fig. 7 The energy dissipation characteristics of pier

2.4 残余位移

现浇双柱墩和装配式双柱墩的残余位移对比情况如图8所示。由图可知,二者的残余位移随着荷载的增加变化趋势有所区别。加载至位移40 mm之前,预制双柱墩试件的残余位移略小于现浇双柱墩试件,但差别基本可以忽略不计。加载至70 mm时,预制试件达到峰值点,此时桥墩试件内部累积的不可恢复损伤也较大,导致其残余位移达到甚至超过现浇双柱墩试件。此后,预制试件的损伤已较大,结构进入承载力下降阶段,残余位移的增幅也较大,加载结束时,残余位移比

上一级增大了34.6%,比现浇墩试件的残余位移高出了8.6%。

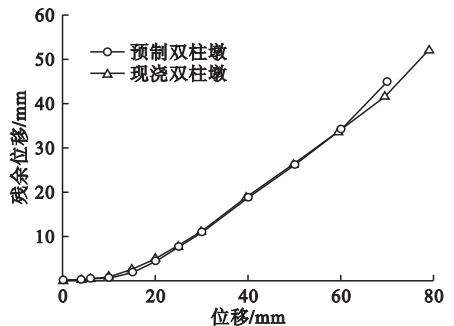


图8 双柱墩残余位移对比

Fig. 8 The comparison of residual displacement of pier

2.5 等效刚度

现浇双柱墩和预制双柱墩等效刚度随着位移变化曲线如图9所示。由图可知,预制双柱墩的初始刚度与现浇墩近似相等,但二者达到屈服荷载时,屈服刚度分别为26.7和23.7,相差12.7%,主要由于墩柱底部套筒的存在提高预制墩刚度。然而,预制双柱墩屈服后的刚度比现浇墩对应值减小了15.4%,这也与其试验过程中的损伤较大相符。且预制双柱墩的等效刚度退化速率始终比现浇试件快,表明其地震响应大,损伤程度比现浇试件严重。

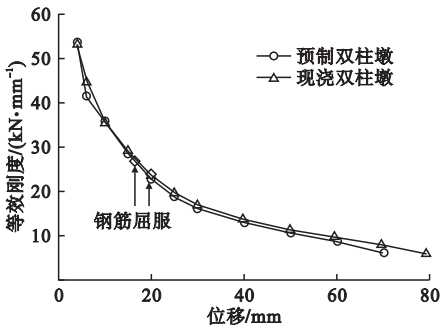


图9 双柱墩等效刚度对比

Fig. 9 The comparison of equivalent stiffness of pier

3 结论

(1) 现浇双柱墩产生裂缝比预制双柱墩稍早,但进入屈服状态较晚;预制墩在加载结束时,墩顶接缝的灌浆料压碎剥落,墩底发生接缝张开;预制双柱墩和现浇双柱墩的底部混凝土压碎范围分别为300 mm左右和200 mm左右,前者墩柱损伤范围稍大。

(2) 现浇双柱墩和预制双柱墩的滞回曲线均较为饱满,具有良好的耗能能力,但现浇双柱墩的滞回曲线仍比预制墩的滞回曲线略饱满,且承载能力和延性稍优于预制墩;对比二者的单圈和累积耗能能力,预制双柱墩单圈耗能性能与现浇墩差距不大,但破坏时累积耗能比现浇桥墩降低了28.8%。

(3) 预制双柱墩和现浇双柱墩间的抗震性能指标差异均在10%左右,表明二者的抗

震性能没有明显差异;预制双柱墩在达峰值点之前的残余位移略小于现浇墩,加载结束时,其残余位移较现浇墩的残余位移高8.6%;预制双柱墩的等效刚度退化速率始终比现浇墩快,与其损伤其残余位移较大有关,其初始刚度与现浇墩基本相等,但套筒的存在使得预制墩的屈服刚度比现浇墩高了12.7%。

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 Yiqiang, ZHU Sheng, ZHAO Yang. Research progress of rapid construction bridge [J]. Chinese journal of highway and transport, 2018, 31(12):1-27.)
- [2] WACKER J M, HIEBER D G, STANTON J F, et al. Design of precast concrete piers for rapid bridge construction in seismic regions [R]. Washington: Washington State Transportation Center, 2005.
- [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,2019,3(36):1-23. (WANG Jingquan, WANG Zhen, GAO Yufeng, et al. Review on aseismic behavior of precast piers; new material, new concept, and new application [J]. Engineering mechanics, 2019, 3(36):1-23.)
- [4] 张兴虎,王建,潘树宾,等. 套筒浆锚连接柱的抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2013,45(2):164-170. (ZHANG Xinghu, WANG Jian, PAN Shubin, et al. Experimental research on seismic performance of new fabricated column spliced by grout sleeves [J]. Journal of Xi'an university of architecture & technology (natural science edition), 2013, 45(2):164-170.)
- [5] 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.
- [6] TAZARF M, SAIIDI M S. Seismic design of bridge columns incorporating mechanical bar splices in plastic hinge regions [J]. Engineering structures, 2016, 124:507-520.
- [7] 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 Gan. Seismic performance of precast piers connected with both grouted splice sleeve and grouted central tenon [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.)
- [8] WANG Z Q, QU H Y, LI T T, et al. Quasi-static cyclic tests of precast bridge columns with different connection details for high seismic zones [J]. *Engineering structures*, 2018, 158: 13 – 27.
- [9] 李锐, 郑毅敏, 赵勇, 等. 配置 500MPa 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 Yimin, ZHAO Yong, et al. Experimental research on seismic performance of precast concrete columns with 500 MPa reinforcement splicing by grout-filled coupling sleeves [J]. *Journal of building structures*, 2016, 37(5): 255 – 263.)
- [10] 赵勇, 李锐, 王晓峰, 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*, 2016, 32(5): 132 – 138. (ZHAO Yong, LI Rui, WANG Xiaofeng, 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*, 2016, 32(5): 132 – 138.)
- [11] 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 Zhiqiang, ZHANG Yangbin, JIANG Shichi, 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.)
- [12] LIU Y Q, ZHOU B B, CAI J G, et al. Experimental study on seismic behavior of precast concrete column with grouted sleeve connections considering ratios of longitudinal reinforcement and stirrups [J]. *Bulletin of earthquake engineering*, 2018, 16: 6077 – 6104.
- [13] 葛继平, 王志强, 李建中, 等. 装配式预应力混凝土双柱桥墩抗震性能研究进展 [J]. *地震工程与工程震动*, 2013, 33(3): 192 – 197. (GE Jiping, WANG Zhiqiang, LI Jianzhong, et al. Recent development in seismic performance of prestressed concrete precast segmental double-column piers [J]. *Journal of earthquake engineering and engineering vibration*, 2013, 33(3): 192 – 197.)
- [14] 葛继平, 夏樟华, 江恒. 灌浆波纹管装配式桥墩双向拟静力试验 [J]. *中国公路学报*, 2018, 31(12): 221 – 231. (GE Jiping, XIA Zhanghua, JIANG Heng. Biaxial quasi-static experiment of precast segmental bridge piers with grouting corrugated pipe connection [J]. *China journal of highway and transport*, 2018, 31(12): 221 – 231.)
- [15] QU H Y, LI T T, WANG Z Q, et al. Investigation and verification on seismic behavior of precast concrete frame piers used in real bridge structures: experimental and numerical study [J]. *Engineering structures*, 2018, 154: 1 – 9.
- [16] 高飞. 单柱式和双柱式节段拼装桥墩抗震性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019. (GAO Fei. Research on seismic performance of single-column and double-column segmental assembly piers [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.)
- [17] 包龙生, 张远宝, 桑中伟, 等. 波纹管连接装配式桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟 [J]. *中国公路学报*, 2018, 31(12): 242 – 249. (BAO Longsheng, ZHANG Yuanbao, SANG Zhongwei, et al. Quasi-static test and numerical simulation analysis for seismic performance of fabricated assemble bridge piers base on bellows connection [J]. *Chinese journal of highway and transport*, 2018, 31(12): 242 – 249.)
- [18] PANG J B K, EBERHARD M O, STANTON J F. Large-bar connection for precast bridge bents in seismic regions [J]. *Journal of bridge engineering*, 2010, 15(3): 231 – 239.
- [19] MASHAL M, PALERMO A, CHEGINI Z. Quasi-cyclic tests of half-scale fully precast bridge bents incorporating emulative and post-tensioned low damage solutions [C]//Second european conference on earthquake engineering and seismology. Istanbul, Turkey: [s. n.], 2014: 1 – 12.
- [20] MASHAL M, PALERMO A. Emulative seismic resistant technology for accelerated bridge construction [J]. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 2019, 124: 197 – 211. (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)