

偏心作用下预制拼装桥墩-盖梁体系抗震性能研究

张 海,王威赫,赵子豪

(沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究不同盖梁节段和盖梁-桥墩连接方式对预制拼装双柱墩偏心作用下的抗震性能的影响。方法 采用有限元软件 ABAQUS 建立 7 组预制拼装双柱墩,对其进行偏心作用下拟静力模拟研究,改变桥墩的盖梁节段连接和盖梁-桥墩连接方式,对比分析拼装桥墩和现浇桥墩的滞回曲线、骨架曲线、破坏形态、耗能性能和延性,研究不同盖梁节段连接和盖梁-桥墩连接方式的桥墩抗震性能。结果 盖梁节段键齿连接桥墩,采用灌浆套筒和预应力连接的承载能力与现浇桥墩相比均有小幅度提高,提高幅度在 10% 以内,抗震性能参数几乎一致。结论 盖梁斜键齿连接,盖梁-桥墩灌浆套筒和盖梁-桥墩预应力连接的预制拼装桥墩与现浇桥墩性能基本一致,同样具有良好抗震性能和整体性,满足抗震要求。

关键词 预制拼装桥墩;抗震性能;有限元分析;盖梁节段连接;盖梁-桥墩连接

中图分类号 TU997;U443.22

文献标志码 A

引用格式:张海,王威赫,赵子豪. 偏心作用下预制拼装桥墩-盖梁体系抗震性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):885-893. (ZHANG Hai, WANG Weihe, ZHAO Zihao. Study on seismic performance of precast bridge capping beam-pier system under eccentric action [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(5):885-893.)

Study on Seismic Performance of Precast Bridge Capping Beam-pier System under Eccentric Action

ZHANG Hai, WANG Weihe, ZHAO Zihao

(School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to study the seismic performance of precast double column piers with different capping beam segments and capping beam-pier connection methods under eccentric loading, seven groups of precast double column pier models were established by using finite element software ABAQUS to carry out quasi-static simulation analysis under eccentric loading. Withing changing the capping beam segments and capping beam-pier connection methods, the hysteresis curve,

收稿日期:2023-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52378357)

作者简介:张海(1972—),男,副教授,博士,主要从事桥梁结构设计等方面研究。

skeleton curve, failure mode, energy dissipation performance, ductility, etc., and the seismic performance of double column piers was studied. The results show that The results show that the load performance of the bridge piers connected by grouted sleeves and pre-stressed connections in the capping beam segment is slightly improved compared to cast-in-place bridge piers, with an improvement range of less than 10%, and the seismic performance parameters are almost the same. With connected by inclined key teeth of the capping beam, grouting sleeve and prestressed connection of the capping beam-pier have basically the same performance as the cast-in-place bridge piers, and also have good seismic performance and integrity, meeting seismic requirements.

Key words: precast bridge pier; seismic performance; finite element analysis; capping beam segment connection; capping beam-pier connection

随着城市现代化的发展,预制拼装体系逐渐在我国城市桥梁建设中得到了广泛应用^[1-3]。通过工厂预制和现场拼装的建造方式,极大缩短了现场施工周期,而且受现场施工空间和交通线路制约较小,有效减少了对周边环境的影响^[4-6],不仅适用于新桥的建设,也可用于旧桥的维修加固。

在桥梁下部结构的装配体系的应用中,墩柱和盖梁采用预制拼装形式占比较大,如灌浆套筒^[7-9]、灌浆波纹管^[10]、预应力^[11-15]连接等。黄青云等^[16]开展了干接缝、钢管连接和螺栓钢管连接三种方式下预制拼装桥墩的抗震性能研究,结果表明,钢管或钢管螺栓连接具有更好的抗震性能。刘雪山等^[17]研究了不同构造下的预制拼装桥墩抗震性能,揭示了预应力拼装桥墩在往复荷载作用下的受力性能。M. M. Islam 等^[18]设计了一种混合连接预制拼装双柱墩,研究表明,墩柱-承台承插式连接,墩柱-盖梁灌浆管道连接体系具有良好的抗震性能。D. H. Kim 等^[19]采用现浇与预制结合的方式预制拼装桥墩,并对其进行了拟静力试验,结果表明,该试件具有优良的耗能能力、延性和侧向强度,可用于中、高地震区。

由于采用不同连接方式时结构的抗震性能表现不尽相同,并且较少考虑竖向偏心作用影响,因此拼装桥墩的抗震性能具有局限性和不明确性。基于此,笔者以某实际高架桥梁工程为依托,通过对7组偏心作用下预

制拼装双柱墩开展拟静力模拟研究,改变拼装桥墩的盖梁节段连接及盖梁-桥墩连接方式,探究偏心荷载作用下不同拼装方式对其抗震性能的影响。研究表明,预制拼装桥墩-盖梁体系桥墩性能与现浇桥墩基本一致,同样具有良好的抗震性能和整体性,满足抗震要求。

1 有限元模型

1.1 依托工程概述

笔者以长春净月开发区东部快速路南延长线某段主线高架桥梁为依托,选取该高架桥第四联处盖梁-桥墩为实例,盖梁悬臂长度 8.825 m,横桥向宽度 2.2 m,纵桥向 24.65 m,根部截面高度 2.6 m,悬臂端截面高度为 1.3 m;桥墩采用方柱墩接承台,宽×长为 1.5 m×2.0 m,墩高 10.7 m。盖梁-桥墩构造如图 1 所示。

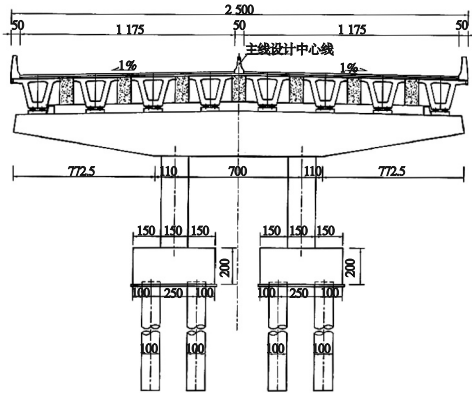


图1 盖梁-桥墩构造图

Fig. 1 Structural of engineering capping beam-pier

1.2 建立模型

采用有限元软件 ABAQUS 建立 7 组预制拼装双柱墩三维实体模型,分析盖梁节段连接方式和盖梁 – 桥墩连接方式对体系抗震性能的影响。模型的连接方案及编号见表 1,现浇桥墩用“RC”命名,预制拼装混凝土模型用“A-B”形式命名,“A”表示盖梁节段连接形式,共设计整体现浇(ZT^[1])、牛腿连接(NT)和斜键齿(JC)三种连接形式;“B”表示盖梁 – 桥墩连接形式,设计灌浆套筒(T)和预应力(Y)两种连接形式。

1.2.1 单元类型选取与网格划分

有限元模型尺寸与实际工程保持一致,节段拼装盖梁和桥墩混凝土采用实体单元(C3D8R)模拟,普通钢筋和预应力筋采用桁

表 1 模型连接方案及试件编号

Table 1 Connection scheme and number of model

试件编号	盖梁节段连接	盖梁 – 桥墩连接
RC	现浇	现浇
JC-T	斜键齿	灌浆套筒
JC-Y	斜键齿	预应力
ZT-T	整体现浇	灌浆套筒
ZT-Y	整体现浇	预应力
NT-T	牛腿连接	灌浆套筒
NT-Y	牛腿连接	预应力

架单元(T3D2)模拟,灌浆套筒采用壳单元(S4R)模拟。模型盖梁和桥墩通过结构化网格手段进行划分,网格尺寸为 250 mm。有限元模型如图 2 所示。

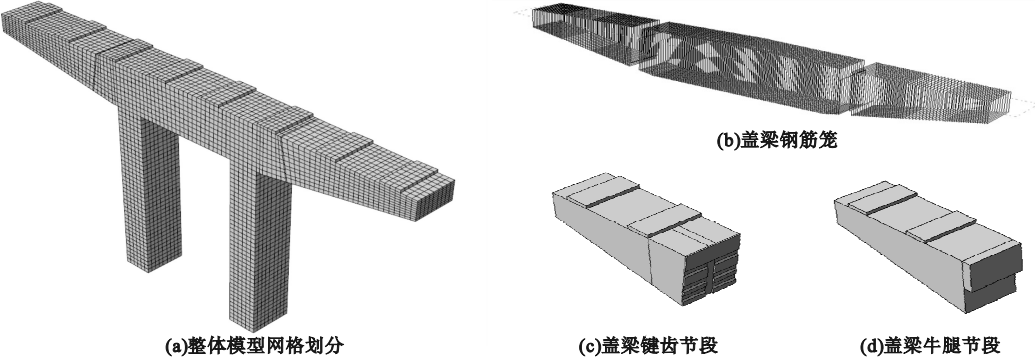


图 2 预制拼装双柱墩模型
Fig. 2 Precast double-pier model

1.2.2 材 料

混凝土采用损伤塑性模型(CDP)模拟,强度等级为 C50,单轴抗压强度取 38.5 MPa,单轴抗拉强度取 2.85 MPa。CDP 模型中的膨胀角取 38°,离心率取值为 0.1,等效双轴抗压屈服应力比为 1.16,受拉子午线与受压子午线常应力的比值取 0.666 67,黏滞系数取 0.05。预应力筋采用二折线本构模型,弹性模量为 195 GPa、泊松比为 0.3、屈服强度为 1 860 MPa、膨胀系数为 1.2 × 10⁻⁵。灌浆套筒采用理想弹塑性模型,屈服强度为 400 MPa,弹性模量为 210 GPa。

1.2.3 接触与边界条件

模型各部件之间,钢筋单元(Embedded)

嵌入到混凝土单元中,预应力通过降温法连接,降温参数为 600 ℃。盖梁各个节段间采用“面面接触”连接,中段盖梁接触面为主面,悬臂段盖梁接触面为从面,接触关系采用“硬接触”(Hard contact),摩擦模型为“库伦摩擦”,摩擦系数取 0.5。

桥梁下部基础形式为群桩接承台,模型忽略桩基的影响,桥墩底部设置为固定接触(U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0)即可。桥梁上部结构恒载和活荷载分配采用压力(Pressure)类型施加,并在盖梁两端支座处施加反对称往复荷载,加载点设置在支座垫石处,同时与支座表面进行耦合,荷载施加和边界条件如图 3 所示。水平往复荷载采用位移控制加载

方式,初始水平位移为 15 mm,以15 mm递增一级,再以 30 mm 递增至加载结束,每级位移循环两次。加载制度如图 4 所示。

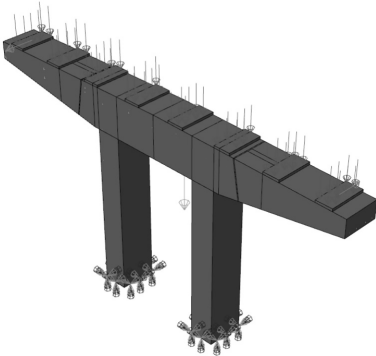


图 3 荷载施加和边界条件

Fig. 3 Load and boundary conditions

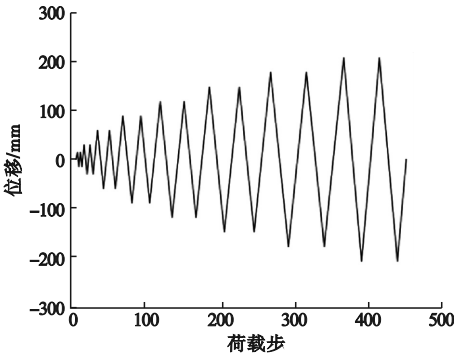


图 4 荷载加载制度

Fig. 4 Load regime

2 结果与分析

2.1 预制装配桥墩抗震性能分析

2.1.1 试件破坏形态

现浇和预制拼装桥墩的混凝土应变和钢筋应力云图如图 5 所示。由图可知,3 组桥墩等效塑性应变区域均在桥墩底部的一定区域内,表明桥墩根部混凝土累积塑性应变最大,并最终在墩底发生弯曲破坏。两组预制拼装桥墩的云图几乎与现浇桥墩一致,说明预制拼装桥墩整体性较好。在盖梁与桥墩连接处,RC 桥墩与 JC-T 桥墩的等效塑性应变区面积要大 JC-Y 桥墩,且主要分布在桥墩内侧,分析原因主要是因为灌浆套筒与混凝土的弹性模量不一致,灌浆套筒弹性模量较大,在循环荷载作用下在有无灌浆套筒的混凝土区域变形不同,导致连接部位塑性应变区域面积较大。RC 桥墩钢筋达到最大拉应力,在墩底发生屈服。JC-T 桥墩和 JC-Y 桥墩除墩底钢筋发生屈服,灌浆套筒及预应力筋在盖梁与桥墩连接处同样发生屈服。采用键齿连接的预制拼装桥墩盖梁中段呈现出连续性的破坏,但在接缝处没有明显塑性应变累积,整体性好。

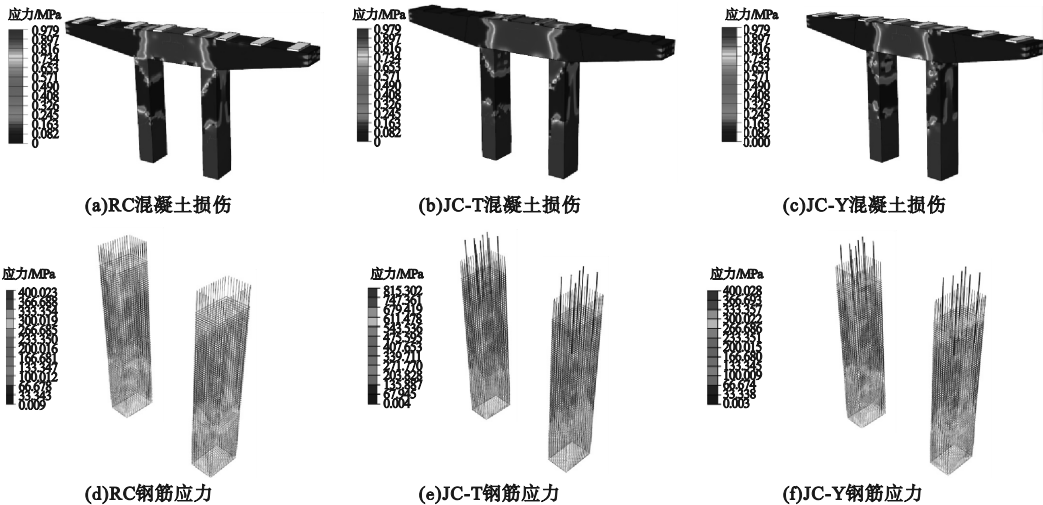


图 5 预制拼装桥墩与现浇桥墩应力云图

Fig. 5 Stress plots of precast pier and cast-in-place pier

2.1.2 滞回曲线

滞回曲线能直观反映出桥墩的承载能力、耗能能力、刚度和延性等性能。灌浆套筒和预应力预制拼装桥墩与现浇桥墩的回曲线如图6所示。由图可知,两种连接的预制拼装桥墩与现浇桥墩的侧向承载能力相差不大,JC-T和JC-Y在水平荷载第一次加载到90 mm时,侧向承载力达到最大,滞回环的形状呈现“梭形”,耗能能力较好;当水平荷载达到120 mm时,模型承载能力有所下降;当第二次加载到120 mm时,无论正向或负

向,与第一次相比,下降幅度增大。分析原因是因为桥墩已经进入弹塑性阶段,接缝处的滑移没有得到有效抑制,且钢筋出现滑移和弯曲变形。随着加载位移的增加,钢筋应力逐渐变大,桥墩刚度出现退化,侧向承载力不断下降,滞回环面积逐渐缩小,出现捏缩效应。对比预制拼装桥墩和现浇桥墩的滞回曲线可以看出,三者差别不大,曲线均比较丰满,表明在往复荷载作用下,预制拼装桥墩消耗的能量与现浇桥墩基本相同,都具有良好的耗能性能,且整体性也较好。

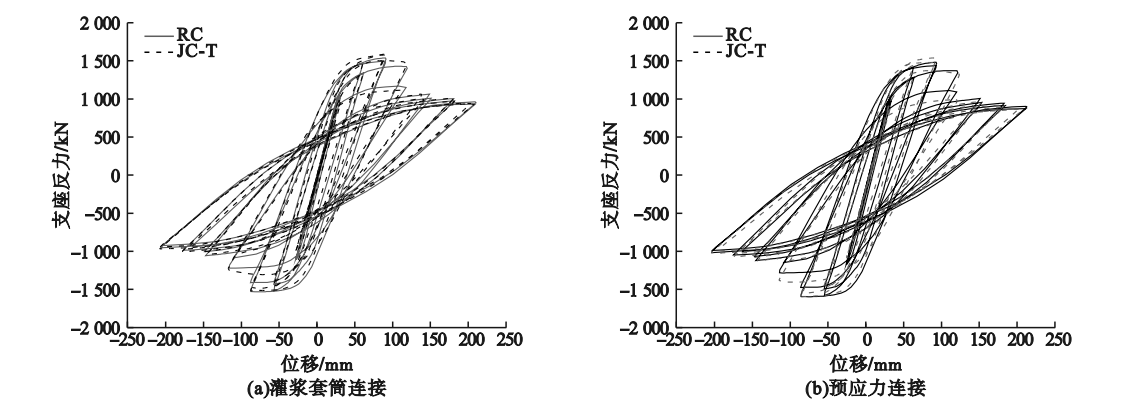


图6 预制拼装桥墩与现浇桥墩荷载-位移滞回曲线

Fig. 6 Load-displacement hysteresis curves of precast pier and cast-in-place pier

2.1.3 骨架曲线

骨架曲线是结构荷载位移滞回曲线每级加载的峰值连线,能够反映试件的初始刚度、最大承载力和延性变形能力等抗震指标。图7为三组桥墩的骨架曲线,各骨架曲线的特征值见表2,其中取墩底受拉钢筋屈服时墩顶的位移为屈服位移、荷载为屈服荷载,曲线峰值点所对应的荷载和位移为峰值荷载和峰值位移。由图7和表2可知,试件JC-T和JC-Y的屈服承载力分别为1 397 kN和1 466 kN,比现浇试件提高了3.7%和8.8%,屈服位移提高了9.2%和15.2%,说明灌浆套筒和预应力连接的桥墩钢筋屈服时刻晚于现浇桥墩。试件JC-T和JC-Y的峰值承载力为1 583 kN和1 601 kN,对比RC试件的15 39 kN分别提高了2.8%和4%;

峰值位移都在88 mm左右,三者相差不大。结果表明拼装桥墩具有优良的承载能力和延性。

2.1.4 抗震性能

现浇桥墩、灌浆套筒和预应力预制拼装桥墩的耗能性能和残余位移如图8所示。由图可知,在加载初期,三组桥墩处于弹性状态,累积耗能和残余位移均比较小;当桥墩进入弹塑性阶段,累积耗能和残余位移均逐渐增加。对比三组桥墩,预制拼装桥墩的耗能与现浇桥墩几乎一致,均具有良好的耗能能力,但JC-T桥墩累积耗能2 199 kN·m,较JC-Y的2 227 kN·m降低了1.3%;三组桥墩的残余位移中RC桥墩最大,JC-T和JC-Y桥墩小于RC桥墩,表明预制桥墩的震后恢复能力更好^[2]。

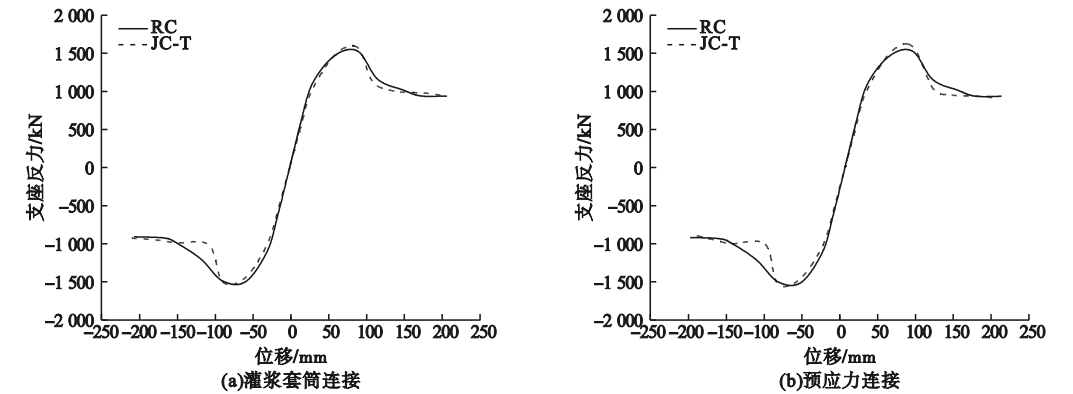


图7 预制拼装桥墩与现浇桥墩骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of precast pier and cast-in-place pier

表2 骨架曲线特征值

Table 2 Characteristic value of skeleton curves

试件编号	加载方向	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	峰值荷载/kN	峰值位移/mm
RC	正向	1 323.7	47.9	1 539.1	88.5
	负向	1 347.4	46.3	1 515.4	87.1
JC-T	正向	1 396.7	52.3	1 583.3	89.3
	负向	1 353.8	51.9	1 518.4	88.8
JC-Y	正向	1 437.8	55.2	1 601.3	88.4
	负向	1 465.7	52.8	1 533.2	89.2

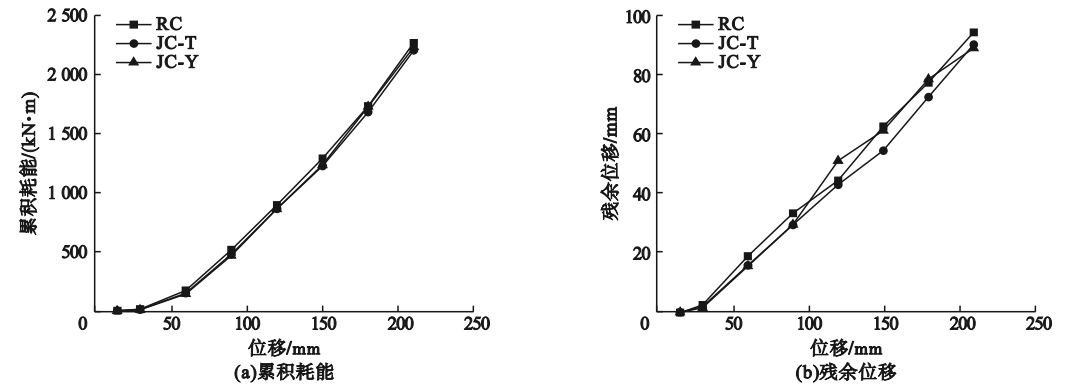


图8 预制拼装桥墩与现浇桥墩抗震性能对比

Fig. 8 Comparison of seismic performance of precast pier and cast-in-place pier

2.1.5 接缝张开量

图9 所示。

预制拼装桥墩破坏时接缝处间隙云图如

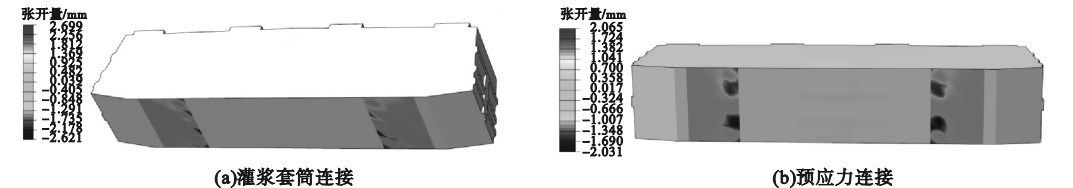


图9 预制拼装桥墩接缝张开图

Fig. 9 Joint gap of precast pier and cast-in-place pier

由图9可知,接缝张开最大位置位于盖梁与桥墩连接处的内侧,此处为桥墩在往复荷载作用时连接受力最大处,在设计时应予以重视。采用预应力连接的桥墩,在地震作用下垂直缝最大张开量、横桥向接缝最大张开量和顺桥向接缝最大张开量分别为0.09 mm、3.08 mm和2.065 mm,灌浆套筒连接桥墩的为0.25 mm、3.39 mm和

2.699 mm。可以看出,地震作用下桥墩的横桥向接缝最大张开量值最大。分析表明,采用预应力连接的预制拼装桥墩整体性要优于灌浆套筒连接的桥墩。

2.2 盖梁节段连接方式影响

保持盖梁-桥墩的连接方式一致,盖梁节段整体现浇、斜键齿连接和牛腿连接桥墩的抗震性能对比如图10所示。

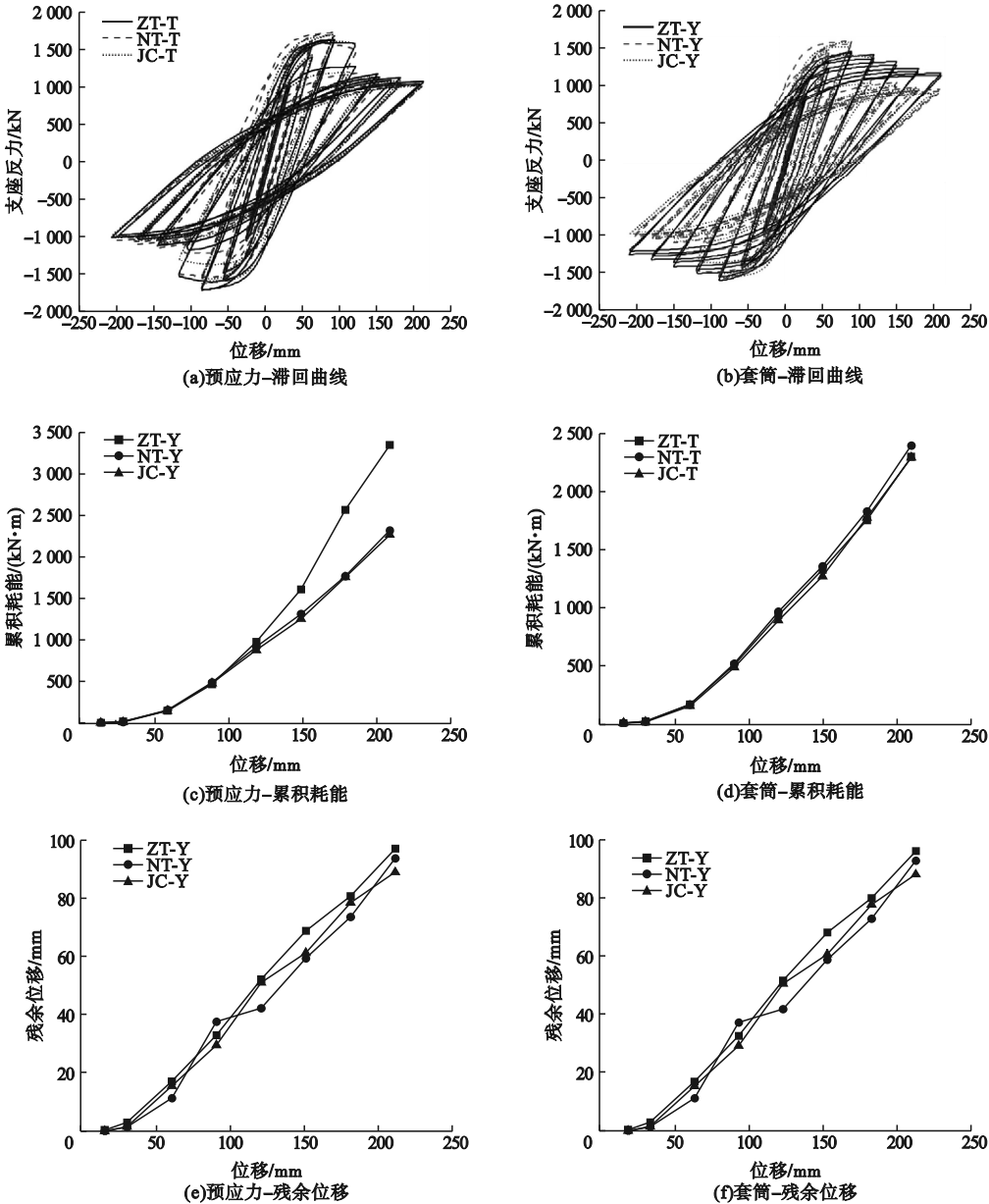


图10 不同盖梁节段连接桥墩抗震性能对比

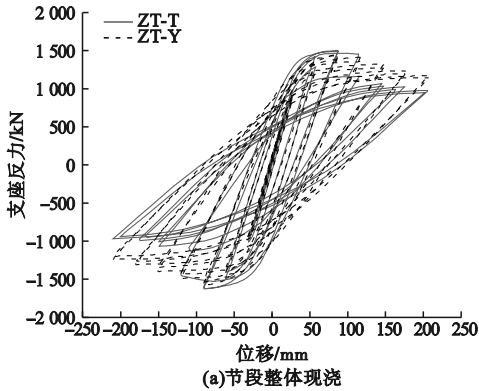
Fig. 10 Seismic performance of piers with different capping beam segments connections

由图10可知,预应力连接下,盖梁节段现浇桥墩承载力峰值为1 474.6 kN,分别是

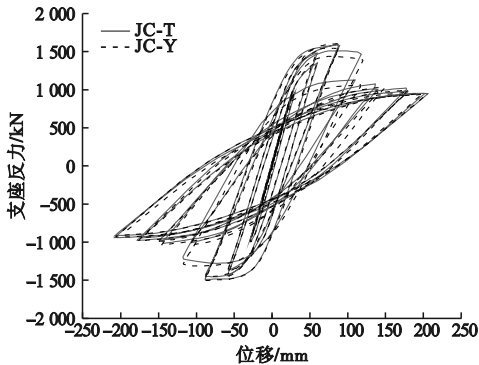
牛腿连接和键齿连接桥墩的 0.91 倍和 0.92 倍;累积耗能为 3 293 kN·m,分别是牛腿连接和键齿连接桥墩的 1.44 倍和 1.48 倍;残余位移同为三组桥墩中最大者。灌浆套筒连接下,三种盖梁连接桥墩的滞回曲线饱满,耗能能力差别不大,残余位移在加载初期现浇节段较大,加载后期牛腿连接较大。综上所述,盖梁节段现浇桥墩虽承载能力微有下降,但耗能能力和延性强,三种连接方式均具有良好的抗震性能。

2.3 盖梁-桥墩连接方式影响

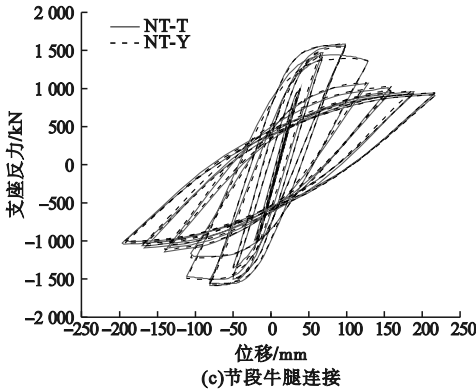
在盖梁节段连接方式一致的情况下,灌浆套筒连接桥墩和预应力连接桥墩的滞回曲线如图 11 所示。从图中可以看出,节段整体现浇的情况下,预应力连接桥墩的滞回曲线更饱满,耗能能力大幅提升,抗震能力强。节段预制拼装的情况下,灌浆套筒连接桥墩和预应力连接桥墩滞回曲线饱满,屈服承载力和峰值承载力相近,破坏时位移近乎一致,差值不超过 5%,抗震性能均满足要求。



(a)节段整体现浇



(b)节段斜键齿连接



(c)节段牛腿连接

图 11 不同盖梁-桥墩连接桥墩抗震性能对比

Fig. 11 Seismic performance of piers with different capping beam-pier connections

盖梁牛腿连接下,预应力连接桥墩破坏时垂直向、横桥向和顺桥向接缝最大张开量分别为 0.331、2.37 和 0.964,灌浆套筒连接桥墩分别为 0.396、2.81、1.06。结合盖梁键齿连接结果,分析表明采用预应力钢绞线拼装的桥墩在往复荷载作用下整体性优于灌浆套筒连接,但二者接缝张开量均相对较小,桥墩荷载作用下未在接缝处发生破坏,保证了桥墩连接的可靠性。

3 结 论

(1) 节段键齿连接的预制拼装桥墩位置与现浇桥墩一致,接缝处没有明显塑性应变累积,整体性好;盖梁和桥墩之间采用预应力和灌浆套筒连接的桥墩滞回曲线饱满,极限承载能力、破坏位移、累积耗能与残余位移与现浇桥墩一致,差值均在 10% 以内,抗震性能良好。

(2) 盖梁与桥墩为预应力连接时,盖梁整体现浇连接承载力小于牛腿连接和键齿连接,但累积耗能显著高于二者。当为灌浆套筒连接时候,节段三种连接的抗震性能均良好。

(3) 在保持盖梁节段连接方式一致时,盖梁-桥墩灌浆套筒和预应力连接桥墩抗震性能近乎一致,差值不超过 5%,满足抗震要求,但预应力连接桥墩在垂直向、横桥向和顺桥向的接缝张开量均小于灌浆套筒连接,整体性更好。

参考文献

- [1] 刘波,陈浩,陈雁云.某城市桥梁预制墩柱与承台拼装施工技术[J].施工技术,2018,47(24):73-76.
(LIU Bo, CHEN Hao, CHEN Yanyun. Construction technology of prefabricated pier and pile cap assembly some city bridge [J]. Construction technology, 2018, 47(24):73-76.)
- [2] 闫明吉,殷天军,卞蜀陵,等.上海长江大桥工程墩柱分节预制安装施工技术[J].中国港湾建设,2010(3):39-44.
(YAN Mingji, YIN Tianjun, BIAN Shuling, et al. Construction technology for segment precasting and installation of pier stud in Shanghai Yangtze river bridge project [J]. China harbour engineering, 2010(3):39-44.)
- [3] 尹富秋.中心城区高架桥桥墩预制拼装施工关键技术[J].施工技术,2017,46(12):80-82.
(YIN Fuqiu. Construction technology of viaduct pier precast assembly in central city [J]. Construction technology, 2017, 46(12):80-82.)
- [4] 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 Jingquan, WANG Zhen, GAO Yufeng, et al. Review on a seismic behavior of precast piers: new material, new concept, and new application [J]. Engineering mechanics, 2019, 36(3):1-23.)
- [5] 陈彦江,丁梦佳,许维炳,等.预制拼装桥墩体系及其抗震性能研究进展[J].中国公路学报,2022,35(12):56-76.
(CHEN Yanjiang, DING Mengjia, XU Weibing, et al. Research process of the seismic performance for pre-fabricated concrete pier system [J]. China journal of highway and transport, 2022, 35(12):56-76.)
- [6] 彭华春,张康康,时松,等.节段预制拼装桥梁研究综述[J].铁道标准设计,2022,66(10):75-83.
(PENG Huachun, ZHANG Kangkang, SHI Song, et al. Summary of research on segment precast assembled bridge. [J]. Railway standard design, 2022, 66(10):75-83.)
- [7] AMELI M J, PANTELIDES C P. Seismic analysis of precast concrete bridge columns connected with grouted splice sleeve connectors [J]. Journal of structural engineering, 2017, 143(2):04016176.
- [8] HABER Z B, MACKIE K R, AI-JELAWY H M. Testing and analysis of precast columns with grouted sleeve connections and shifted plastic hinging [J]. Journal of bridge engineering, 2017, 22(10):04017078.
- [9] 黄宜,邱文亮,黄才良,等.单节段装配式桥墩抗震性能试验研究[J].大连理工大学学报,2016,56(5):481-487.
(HUANG Yi, QIU Wenliang, HUANG Cai liang, et al. Experimental study of seismic performance of single segmental precast bridge piers [J]. Journal of Dalian university of technology, 2016, 56(5):481-487.)
- [10] 姜海西,王志强,沈佳伟,等.灌浆金属波纹管连接预制拼装立柱抗震性能试验研究[J].结构工程师,2016,32(5):132-138.
(JIANG Haixi, WANG Zhiqiang, SHEN Jiawei, et al. Anti-seismic performance testing of prefabricate assembly pillars connected with grouting metal corrugated pipe [J]. Structural engineers, 2016, 32(5):132-138.)
- [11] YAMASHITA R, SANDERS D H. Sanders. Seismic performance of precast unbonded prestressed concrete columns [J]. ACI structural journal, 2009, 106(6):821-830.
- [12] MOHAMED E, AARON J B, HAITHAM M D. Seismic behavior of posttensioned concrete-filled fiber tubes [J]. Journal of composites for construction, 2010, 14(5):616-628.
- [13] SIDERIS P, AREF A J, FILIATRAULT A. Large-scale seismic testing of a hybrid sliding-rocking posttensioned segmental bridge system [J]. Journal of structural engineering, 2014, 140(6):04014025.
- [14] YANG C C, OKUMUS P. Ultrahigh-performance concrete for posttensioned precast bridge piers for seismic resilience [J]. Journal of structural engineering, 2017, 143(12):04017161.
- [15] BU Zhanyu, OU Yuchen, SONG Jianwei, et al. Cyclic loading test of unbonded and bonded posttensioned precast segmental bridge columns with circular section [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21(2):1-17.
- [16] 黄云青,赵建锋.不同连接方式对预制拼装桥墩抗震性能的影响[J].青岛理工大学学报,2019,40(6):38-43.
(HUANG Yunqing, ZHAN Jiangfeng. Influence of different connection modes on seismic performance of precast segmental assembly bridge pier [J]. Journal of Qingdao university of technology, 2019, 40(6):38-43.)
- [17] 刘雪山,李建中,张宏杰,等.不同构造下的预制拼装钢管混凝土桥墩抗震性能试验[J].中国公路学报,2021,34(11):116-128.
(LIU Xueshan, LI Jianzhong, ZHANG Hongjie, et al. Experimental analysis of seismic performance of precast assembled concrete filled steel tube piers under different structures [J]. China journal of highway and transport, 2021, 34(11):116-128.)
- [18] ISLAM M M, TRAVIS T, DAVID H S, et al. Seismic performance of precast, pretensioned, and cast-in-place bridges: Shake table test comparison [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21(10):04016071.
- [19] KIM D H, MOON D Y, KIM M K, et al. Experimental test and seismic performance of partial precast concrete segmental bridge column with cast-in-place base [J]. Engineering structures, 2015, 100:178-188.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)