

文章编号:1671-6833(2021)02-0013-06

采用UHPC材料连接的装配式桥墩抗震性能研究

赵卓¹, 耿佳硕², 王建强³

(1.宁波工程学院 浙江省土木工程工业化建造工程技术研究中心, 浙江 宁波 315000; 2.同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 3.郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了研究采用超高性能混凝土(UHPC)材料连接的装配式桥墩的抗震性能, 结合实际工程, 采用ABAQUS分别建立了UHPC材料连接的装配式桥墩和整体现浇桥墩的有限元模型, 并对2种类型桥墩进行抗震性能分析。结果表明: 采用UHPC材料连接的装配式桥墩与整体现浇桥墩的破坏过程和破坏形态相近, 在设计时应加强装配式桥墩立柱标准段下部与变截面连接部位的抗震性能; 采用UHPC材料连接的装配式桥墩的滞回性能、水平等效刚度、耗能性能、残余位移等与整体现浇桥墩基本一致, 满足桥梁的抗震要求。采用UHPC作为装配式桥墩拼接段的灌注材料, 可以利用其良好的力学性能和工作性能加快施工进度, 发挥装配式桥墩的优势。

关键词: 装配式桥墩; UHPC; 现浇桥墩; 抗震性能

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2021.02.006

0 引言

超高性能混凝土(UHPC)具有高强度、高韧性、高耐久性以及良好的工作性能, 特别是具有较高的抗拉性能和延性^[1-4]。因此, 近年来UHPC在桥面铺装、装配式结构中应用广泛。目前, 装配式施工技术已在桥梁上部结构施工过程中成熟应用。为进一步缩短施工工期, 下部桥墩也开始逐步采用装配式施工技术。该技术主要有插槽式连接、承插式连接和灌浆套筒连接等连接方式。但这些连接方式施工难度较大, 施工速度受到影响。而采用UHPC作为拼接段的灌注材料, 可以利用其早期强度高、自密实性等优点提高施工速度, 发挥装配式优势。彭超凡等^[5]对采用UHPC连接的预制柱进行了拟静力试验, 研究了搭接段长度对预制柱抗震性能的影响, 结果表明, 搭接长度为 $10d$ 的UHPC连接试件与整浇构件的抗震性能相当。莫金生等^[6]对采用UHPC连接的预制桥墩进行拟静力试验, 结果表明, 预制桥墩的破坏为中部标准段的弯曲破坏, 桥墩底部连接段无明显破坏。Tazarv等^[7-8]对采用UHPC作为灌浆套筒连接灌浆材料的预制装配式桥墩进行了拟静力试

验, 结果表明, 采用UHPC作为灌浆套筒的灌浆材料可以减小套筒连接长度, 并且采用这种连接方式的装配式桥墩具有良好的抗震性能。Yang等^[9]对高烈度区采用UHPC连接的装配式桥墩进行了拟静力试验, 与普通连接方式相比, 采用UHPC连接可以有效减小装配式桥墩的破坏, 明显提高其承载力和刚度。

本文结合实际工程, 分别对采用UHPC材料连接的装配式桥墩和整体现浇桥墩进行分析, 研究桥墩的抗震性能。

1 工程概况

某高速公路连接线工程中部分桥墩采用UHPC湿接缝连接的装配式桥墩, 桥墩由承台、立柱和盖梁3部分组成。承台与立柱、立柱与盖梁之间的连接部位预留交错布置的纵向钢筋并通过后浇UHPC材料连接。选取预制立柱高度为9 m的装配式桥墩为研究对象, 同时选取与该装配式桥墩高度一致的整体现浇桥墩作为对比, 如图1所示。

承台为现场绑扎钢筋并浇筑C35混凝土, 承台尺寸为5 m×5 m×2 m。装配式桥墩中立柱与盖

收稿日期: 2020-10-20; **修订日期:** 2020-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708511); 宁波市“科技创新2025”重大专项(2019B10076); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ20E080012)

作者简介: 赵卓(1970—), 男, 河南郑州人, 宁波工程学院教授, 博士, 主要从事工程结构可靠性研究, E-mail: zzhuo_99@163.com。

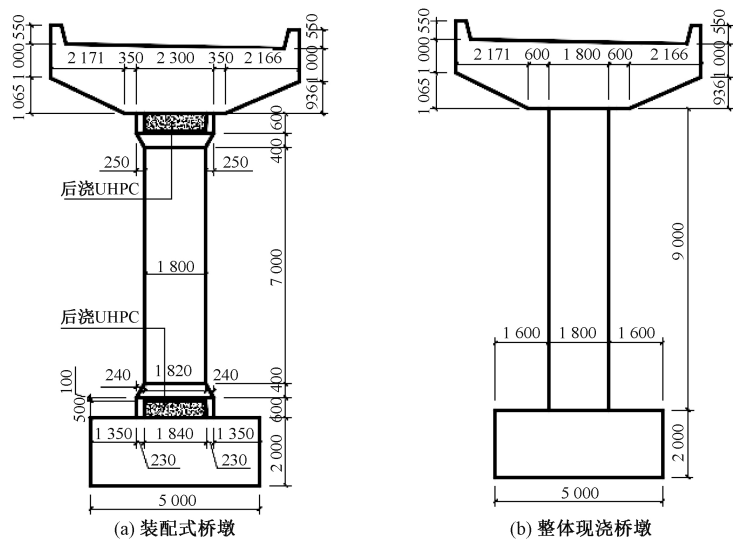


图 1 装配式桥墩和整体现浇桥墩示意图 (mm)

Figure 1 Schematic diagram of prefabricated pier and cast-in-place pier (mm)

梁在工厂提前预制,混凝土等级分别为 C40 与 C50,预制立柱在两端部连接处分别设置 1 个杯口,连接时向杯口内灌注 UHPC,混凝土杯口充当 UHPC 材料的模板,可提高施工效率。UHPC 材料在施工现场搅拌并通过注浆管进行灌注,要求其抗压强度不低于 120 MPa,抗拉强度不低于 9 MPa。连接处的纵向钢筋的锚固长度为 470 mm,超过了 10 倍的钢筋直径,纵向受力钢筋设置如图 2(a)所示,上下连接段钢筋布置如图 3 所示。连接段处承台与立柱、立柱与盖梁的纵向钢筋交错布置,与套筒连接、焊接连接等方式相比,采用这种连接方式对施工精度的要求更低,便于施工。

整体现浇桥墩的各项参数与装配式桥墩基本相同,二者最主要的区别在于纵向钢筋的布置。

现浇桥墩的纵向钢筋如图 2(b)所示,钢筋伸入盖梁、承台的长度分别为 1.9、1.8 m,与装配式桥墩相比分别增加了 0.9、0.3 m。

2 桥墩有限元建模

2.1 有限元模型

建立桥墩有限元模型时,承台尺寸为 5 m×5 m×2 m,立柱高度为 9 m,截面尺寸为 1.8 m×1.8 m,为简化计算,盖梁尺寸取为 4 m×2.5 m×2 m,模型总高度为 13 m。普通混凝土与 UHPC 材料采用实体单元中的 C3D8R 单元,钢筋材料采用桁架单元中的 T3D2 单元模拟。预制立柱的单元尺寸为 0.4 m,盖梁及承台混凝土单元的单元尺寸为 1 m,钢筋的单元长度为 1 m。UHPC 与普

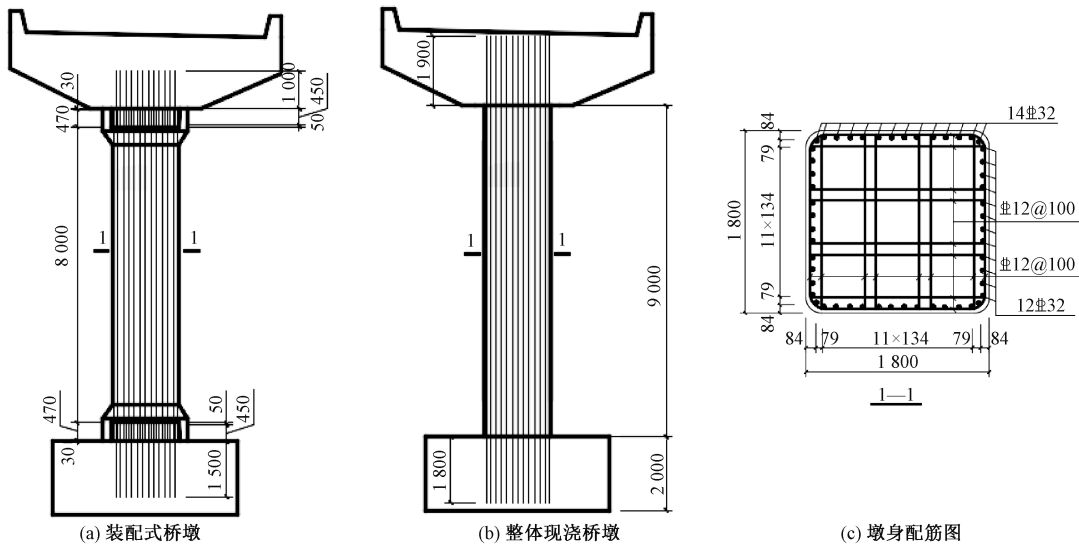


图 2 装配式桥墩和整体现浇桥墩纵向钢筋布置示意图 (mm)

Figure 2 Schematic diagram of longitudinal rebar of prefabricated pier and cast-in-place pier (mm)

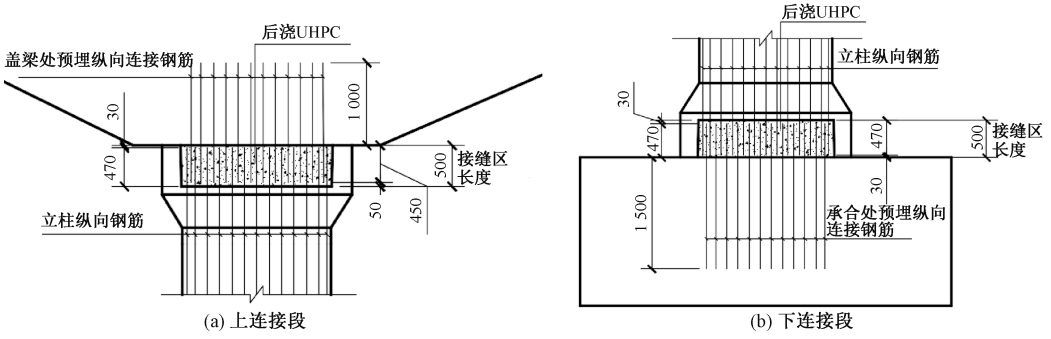


图 3 装配式桥墩上下连接段钢筋布置图 (mm)

Figure 3 Layout of rebar in upper and lower connected part of prefabricated pier (mm)

通混凝土之间采用绑定连接,承台底部采用固结处理。由于篇幅限制,该有限元模型的具体建模情况和对模型有效性的验证详见文献[10]。

2.2 材料应力-应变关系

采用 ABAQUS 分别建立装配式桥墩和整体现浇桥墩的有限元模型,其中普通混凝土的应力-应变关系曲线按照 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[11]中的相关参数选取,普通钢筋的应力-应变关系曲线采用双折线模型,采用的 UHPC 材料的抗压强度为 120 MPa,抗拉强度为 9.1 MPa,弹性模量为 4.55×10^4 MPa。

UHPC 受压阶段的应力-应变关系曲线简化为上升段和下降段两部分^[12],如式(1)所示:

$$f = \begin{cases} f_c \frac{n\xi - \xi^2}{1 + (n-2)\xi}, & \varepsilon \leq \varepsilon_{c0}; \\ f_c \frac{\xi}{2(\xi-1)^2 + \xi}, & \varepsilon > \varepsilon_{c0}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_c 为 UHPC 受压阶段的抗压强度; $n = E_c/E_s$, E_c 为 UHPC 受压阶段的初始弹性模量, E_s 为 UHPC 受压阶段峰值点处割线模量; $\xi = \varepsilon/\varepsilon_{c0}$, ε_{c0} 为 UHPC 受压阶段峰值点处的压应变。

UHPC 受拉阶段的应力-应变关系曲线根据瑞士规范^[13]中的相关规定进行修改,将该曲线简化为三折线,如式(2)所示:

$$f = \begin{cases} E_{11}\varepsilon, & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{te}; \\ f_{te} + E_{12}(\varepsilon - \varepsilon_{te}), & \varepsilon_{te} \leq \varepsilon < \varepsilon_{tu}; \\ f_{tu} - E_{13}(\varepsilon - \varepsilon_{tu}), & \varepsilon_{tu} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{is}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $E_{11} = \frac{f_{te}}{\varepsilon_{te}}$; $E_{12} = \frac{f_{tu} - f_{te}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{te}}$; $E_{13} = \frac{f_{tu} - f_{is}}{\varepsilon_{is} - \varepsilon_{tu}}$; f_{te} 、 ε_{te} 分别为 UHPC 受拉阶段弹性段抗拉强度、拉应变; f_{tu} 、 ε_{tu} 分别为 UHPC 受拉阶段极限抗拉强度、拉应变; f_{is} 、 ε_{is} 分别为 UHPC 受拉阶段软化段控制点抗拉强度、拉应变; E_{11} 、 E_{12} 、 E_{13} 分别为 UHPC 受拉阶段弹性段、强化段、软化段曲线斜率。

2.3 加载方案

在桥墩盖梁顶面施加 18.56 MPa 的竖向面荷载,桥墩对应的轴压比为 0.3。在盖梁侧面施加水平荷载,水平荷载采用位移控制,共分为 12 级进行加载,每级荷载包括正向加载与反向加载,每级加载循环 1 次。当构件达到屈服之前每级加载的水平位移增量为 20 mm,达到屈服后每级加载的水平位移增量为 40 mm。

3 桥墩抗震性能分析

3.1 破坏形态

为了能够直观地反映 2 种桥墩的破坏形态,采用 ABAQUS 中的 DAMAGEC 图与 DAMAGET 图反映混凝土在往复荷载作用下的破坏情况, DAMAGEC 图反映混凝土受压破坏的情况, DAMAGET 图反映混凝土受拉开裂的情况。2 种类型桥墩的破坏形态如图 4 所示。

由图 4 可以看出:①轻微损伤阶段,加载至第 4 级荷载(水平位移为 80 mm)时, DAMAGET 图表明桥墩立柱的中下部将产生受拉破坏,出现裂缝,此时纵向钢筋已经屈服,装配式桥墩的开裂范围主要集中在立柱标准段下部与变截面段交接处,现浇桥墩的开裂主要出现在立柱与承台交接部位;②中等损伤阶段,加载至第 7 级荷载(水平位移为 200 mm)时,前期裂缝进一步扩展, DAMAGEC 图表明装配式桥墩混凝土的受压破坏主要集中在立柱标准段下部与变截面段交接处,现浇桥墩的受压破坏主要出现在立柱底部;③严重损伤阶段,加载至第 10 级荷载(水平位移为 320 mm)时, DAMAGEC 图表明桥墩立柱混凝土受压破坏的区域进一步增大,部分混凝土达到极限压应变被压碎,随着荷载增大,严重破坏区域进一步增大,普通混凝土的破坏加剧,但由于 UHPC 强度较高,未产生明显破坏。在加载过程中,装配

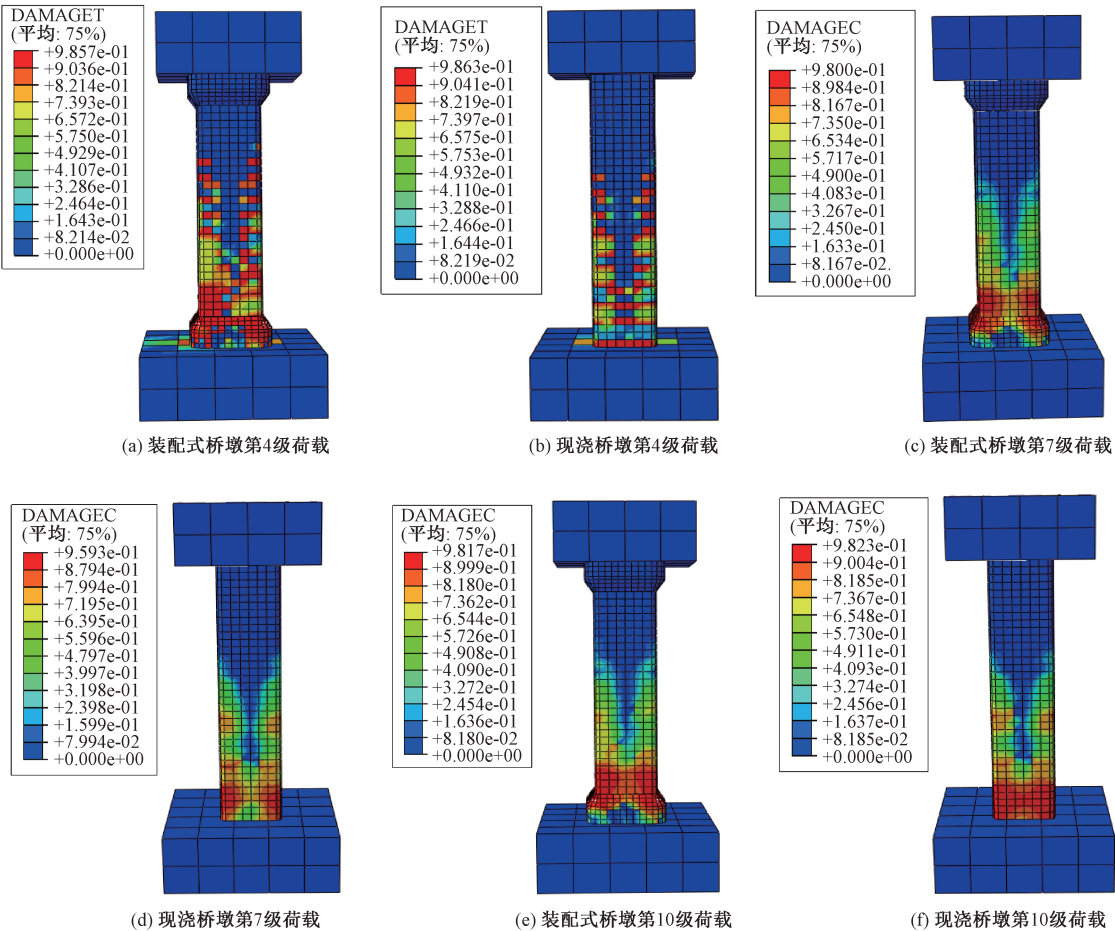


图 4 桥墩破坏形态

Figure 4 Failure mode of piers

式桥墩中 UHPC 和普通混凝土交界面处变形一致,未发生破坏。

3.2 滞回曲线与骨架曲线

2 种类型桥墩的滞回曲线和骨架曲线如图 5 和图 6 所示,骨架曲线特征点见表 1。从图 5、6 和表 1 可以看出:①2 种桥墩的滞回曲线呈梭形,具有稳定的耗能性能,但由于钢筋的屈服,滞回环出现一定的捏拢现象,耗能性能有所降低;②装配式桥墩和现浇桥墩的峰值荷载均在 2 400 kN 左右,二者的承载力基本相同。

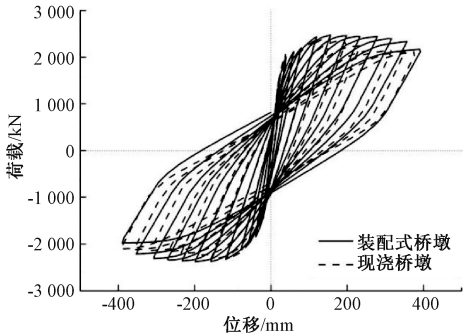


图 5 桥墩滞回曲线

Figure 5 Hysteresis curves of piers

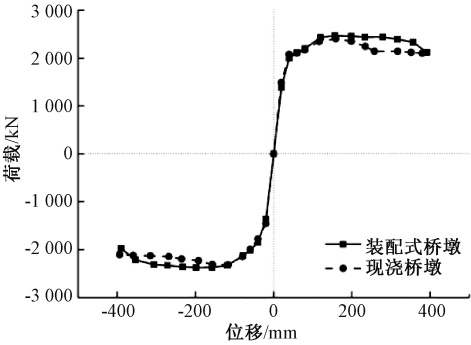


图 6 桥墩骨架曲线

Figure 6 Skeleton curves of piers

3.3 延性性能

采用位移延性系数衡量桥墩的延性性能,位移延性系数为结构极限位移与屈服位移的比值。桥墩屈服位移和极限位移的确定采用以下方式:屈服位移为纵向钢筋屈服时桥墩的水平位移;极限位移为核心区混凝土达到极限压应变时桥墩的水平位移。装配式桥墩和现浇桥墩的位移延性系数基本一致,均大于 4,满足桥墩抗震性能的要求。

表 1 骨架曲线特征点
Table 1 Characteristic points on skeleton curves

桥墩类型	加载方向	屈服点		峰值点		破坏点		延性系数
		P_y/kN	Δ_y/mm	P_{\max}/kN	Δ_{\max}/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	
装配式	正向	2 105.5	58.19	2 467.7	156.32	2 437.2	256.41	4.41
	负向	2 009.2	59.36	2 375.5	157.21	2 336.1	261.23	4.40
	平均	2 057.4	58.78	2 421.6	156.77	2 386.7	258.82	4.40
现浇	正向	2 079.9	52.62	2 403.5	116.77	2 282.4	216.36	4.11
	负向	1 929.9	53.79	2 319.4	116.29	2 203.0	226.34	4.21
	平均	2 004.9	53.21	2 361.5	116.53	2 242.7	221.35	4.16

3.4 水平等效刚度

随着荷载的逐渐增加,桥墩外侧的混凝土会出现受拉开裂并逐渐退出工作,造成桥墩水平刚度逐渐降低。2 种类型桥墩的水平等效刚度退化曲线如图 7 所示,装配式桥墩与现浇桥墩的水平等效刚度的变化趋势基本一致,在达到峰值荷载之前,桥墩水平等效刚度下降幅度较大,之后水平等效刚度的变化较为平缓。

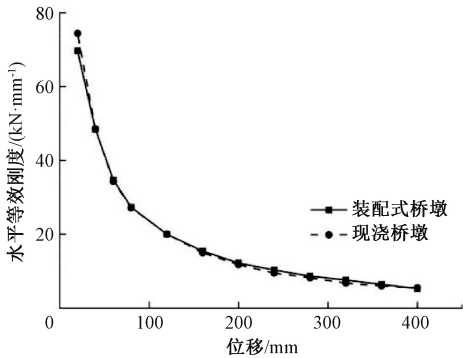


图 7 桥墩水平等效刚度

Figure 7 Horizontal equivalent stiffness of piers

3.5 耗能性能

桥墩的耗能能力是研究桥墩抗震性能的关键指标,采用等效黏滞阻尼比表征桥墩的耗能能力,如图 8 所示,等效黏滞阻尼比为:

$$\xi_{eq} = \frac{\Delta W_i}{4\pi E_e} \quad (3)$$

式中: ΔW_i 为第 i 级荷载作用下桥墩的滞回耗能能力; E_e 为桥墩的弹性应变能力。

由图 8 可以看出,在达到屈服位移之前,2 种桥墩的等效阻尼比基本相同,均相对较小,随着荷载的增大,整体现浇桥墩的等效阻尼比略大于装配式桥墩的等效阻尼比,二者的等效阻尼比均达到 0.15 左右,具有良好的耗能能力。

3.6 残余位移

结构的残余位移是指结构在加载变形并卸载后,所产生的不可恢复的塑性变形,是评价结构抗震性能与损伤程度的一个重要指标。2 种桥墩的

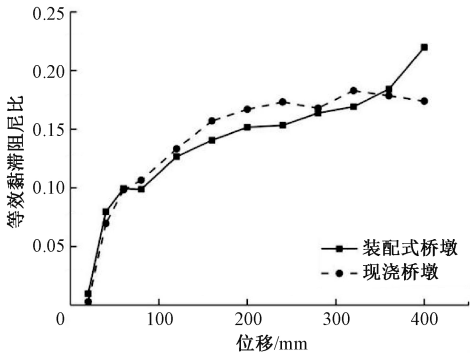


图 8 桥墩等效黏滞阻尼比

Figure 8 Equivalent viscous damping ratio of piers

残余位移如图 9 所示,表明在达到屈服位移之前,2 种桥墩的残余位移均小于 8 mm;随着荷载的增大,桥墩开裂、破坏,塑性变形增大,残余位移也逐渐增大,二者的残余位移基本一致。

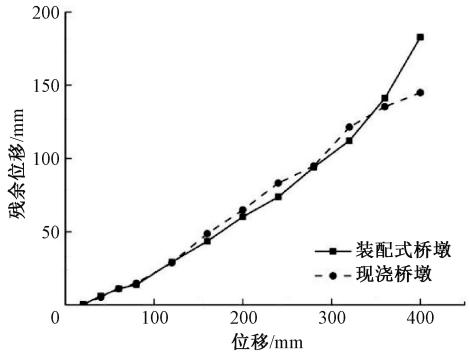


图 9 桥墩水平残余位移

Figure 9 Horizontal residual deformation of piers

4 结论

(1)采用 UHPC 材料连接的装配式桥墩与整体现浇桥墩的破坏过程和破坏形态相近,但装配式桥墩的破坏主要集中在立柱标准段下部与变截面连接的部位,现浇桥墩的破坏主要集中在立柱底部与承台连接的部位,在设计时应加强装配式桥墩立柱标准段下部与变截面连接部位的抗震性能,可增大变截面处混凝土的强度等级和截面尺寸、提高其配筋率等。

(2)采用UHPC材料连接的装配式桥墩的滞回性能、水平等效刚度、耗能性能、残余位移等与整体现浇桥墩基本一致,装配式桥墩具有良好的抗震性能,满足桥墩的抗震要求。

参考文献:

- [1] 张哲,邵旭东,李文光,等.超高性能混凝土轴拉性能试验[J].中国公路学报,2015,28(8):50-58.
- [2] 王俊颜,耿莉萍,郭君渊,等.UHPC的轴拉性能与裂缝宽度控制能力研究[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):165-169.
- [3] WILLE K,EL-TAWIL S,NAAMAN A E.Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading[J].Cement and concrete composites,2014,48:53-66.
- [4] SHAFIEIFAR M,FARZAD M,AZIZINAMINI A.Experimental and numerical study on mechanical properties of ultra high performance concrete (UHPC)[J].Construction and building materials,2017,156:402-411.
- [5] 彭超凡,郑七振,龙莉波,等.以UHPC材料连接的预制柱抗震性能试验研究[J].建筑施工,2016,38(12):1711-1713.
- [6] 莫金生,马磊,张洁,等.UHPC连接节段拼装桥墩拟静力试验[J].结构工程师,2018,34(增刊1):88-95.
- [7] TAZARV M,SAIIDI M S.UHPC-filled duct connections for accelerated bridge construction of RC columns in high seismic zones[J].Engineering structures,2015,99:413-422.
- [8] TAZARV M,SAIIDI M S.Design and construction of UHPC-filled duct connections for precast bridge columns in high seismic zones[J].Structure and infrastructure engineering,2017,13(6):743-753.
- [9] 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.
- [10] 耿佳硕.采用UHPC现浇湿接缝连接的装配式桥墩抗震性能研究[D].郑州:郑州大学,2019.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [12] 杨剑,方志.超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究[J].混凝土,2008(7):11-15.
- [13] Ultra-high performance fiber reinforced cement-based composites(UHPFRC).Construction material, dimensioning and application[S].Switzerland:Swiss Federal Institute of Technology,2016.

Study on Seismic Performance of Prefabricated Pier Connected by UHPC

ZHAO Zhuo¹, GENG Jiashuo², WANG Jianqiang³

(1.Zhejiang Engineering Technology Research Center of Civil Engineering Industrialized Construction, Ningbo University of Technology, Ningbo 315000, China; 2.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3.School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of the prefabricated pier connected by Ultra-high performance concrete (UHPC), according to the practical engineering, the finite element model of the prefabricated pier connected by UHPC and the cast-in-place pier have been established by ABAQUS, the seismic performance of the prefabricated pier connected by UHPC and the cast-in-place pier were analyzed. The results showed that the failure process and failure form of the prefabricated pier connected by UHPC were similar to that of the cast-in-place pier, and the seismic performance of the joint between the prefabricated pier bottom and the variable section part should be strengthened. The hysteretic behavior, horizontal equivalent stiffness, energy dissipation, and residual displacement of the prefabricated pier connected by UHPC were basically consistent with the cast-in-place pier, which could satisfy the seismic requirements of the bridge. So UHPC could be used as the filling material for the prefabricated pier joints, which could improve the construction speed by using its good mechanical properties and working performance, thus it could exert the advantages of prefabricated construction technology.

Key words: prefabricated pier; UHPC; cast-in-place pier; seismic performance