

引用本文:孟凌霄,孙中华,朱志鑫,等.中空夹层预制装配式圆形桥墩抗震性能参数分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(5):138-147.
MENG Lingxiao, SUN Zhonghua, ZHU Zhixin, et al. Parameters analysis of seismic performance of prefabricated circular pier with hollow interlayer[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 138-147.

DOI:10.19815/j.jace.2022.01086

中空夹层预制装配式圆形桥墩抗震性能参数分析

孟凌霄¹, 孙中华², 朱志鑫³, 许英东¹, 张传平², 付涛³

(1. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100044; 2. 中建八局第一建设有限公司, 山东 济南 250102;
3. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101)

摘要:为了降低预制装配式桥墩的吊装质量,实现预制装配式桥墩轻量化,提出了基于灌浆套筒连接的中空夹层预制装配式圆形桥墩,设计并制作了缩尺模型,通过拟静力试验对其抗震性能进行了分析。采用ABAQUS有限元分析软件建立了中空夹层预制装配式桥墩的精细化有限元模型,将拟静力试验结果与有限元计算结果进行对比分析,验证了有限元模型的准确性。通过改变中空夹层预制装配式圆形桥墩试件轴压比和墩身中空率,研究不同轴压比和中空率对其抗震性能的影响。基于实际工程中的圆形桥墩,设计了中空夹层预制装配式圆形实桥桥墩,并进行抗震性能分析。结果表明:在往复荷载作用下,随着轴压比的增大,中空夹层预制装配式圆形桥墩抗侧极限承载力有所提高,水平承载力显著增长,位移延性系数下降较为明显,初始切线刚度增幅较大,提高了加载初期墩身抵抗变形能力;通过改变中空钢管的高度可以增大中空夹层预制装配式圆形桥墩墩身中空率,随着墩身中空率的增大,中空夹层预制装配式圆形桥墩更好地发挥了中空钢管变形能力强、刚度大等优势,墩身抗弯承载力显著提高,墩身初始切线刚度明显增大,加载初期桥墩抵抗变形能力有所增强,墩身延性有所降低;中空夹层预制装配式圆形实桥桥墩滞回环较为饱满,具有较高的抗弯承载能力,抗震性能优良;墩身内预埋中空钢管对预制装配式桥墩抗震性能产生积极影响,轴压比和中空率的增大均可显著提高中空夹层预制装配式圆形桥墩的水平抗弯承载力,提高桥墩墩身加载初期抵抗变形能力。

关键词:装配式桥墩;抗震性能;拟静力试验;滞回耗能;中空夹层

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)05-0138-10

Parameters analysis of seismic performance of prefabricated circular pier with hollow interlayer

MENG Lingxiao¹, SUN Zhonghua², ZHU Zhixin³, XU Yingdong¹, ZHANG Chuanping², FU Tao³

(1. China Construction Infrastructure Corp., Ltd., Beijing 100044, China; 2. The First Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan 250102, Shandong, China; 3. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: In order to reduce the hoisting weight of prefabricated piers and realize the lightweight

收稿日期: 2022-01-23

基金项目: 中建基础科技研发项目(CSCIC-2020-KT-05);国家自然科学基金项目(51408339);

山东省自然科学基金项目(ZR2021ME227);山东省研究生教育质量提升计划项目(SDYAL19110);

山东省高等学校科技计划项目(J18KA216)

作者简介: 孟凌霄(1991-),男,工程师, E-mail: muluo690119@163.com。

通信作者: 付涛(1981-),男,工学博士,教授, E-mail: greenvillage_17@163.com。

of prefabricated piers, a kind of prefabricated circular pier with a hollow interlayer based on grouted sleeves connection was proposed, and a scale model of prefabricated circular pier with hollow interlayer was designed and manufactured. The seismic performance was analyzed by pseudo static test. The refined finite element model of the prefabricated circular pier with hollow interlayer was established by ABAQUS finite element analysis software. The accuracy of the finite element model was verified by comparing results of the pseudo static test with that of the finite element calculation. By changing the axial compression rate and hollow rate of the prefabricated circular pier with hollow interlayer, the influences of different axial compression rate and hollow rate on the seismic performance of the prefabricated circular pier with hollow interlayer was studied. Based on the circular piers in actual engineering, a prefabricated circular pier with hollow interlayer of actual engineering were designed and their seismic performance was analyzed. The results show that under the reciprocating load, with the increase of axial compression rate, the limit bearing capacity of a prefabricated circular pier with hollow interlayer is improved, the horizontal bearing capacity enhances significantly, the displacement ductility coefficient decreases more apparently, and the initial tangential stiffness increases more, which improve the resistance to deformation of the pier at the initial period of loading. By changing the height of hollow steel tube, the hollow rate of prefabricated circular pier with hollow interlayer is increased. With the increase of hollow rate of pier body, the prefabricated circular pier with hollow interlayer can better take the advantages of strong deformation capacity and high stiffness of hollow steel tube, the bending bearing capacity of the pier body is significantly improved, the initial tangential stiffness of the pier body is significantly increased, the resistance to deformation of the pier at the initial period of loading is enhanced, and the ductility of the pier body is reduced. The hysteresis loop of the prefabricated circular pier with hollow interlayer of actual engineering is full. It has a higher flexural load capacity and excellent seismic performance. The pre-embedded hollow steel tube in the pier body has a positive effect on the seismic performance of prefabricated piers. The increase in both the axial compression rate and hollow rate can significantly improve the horizontal flexural bearing capacity of the pier and enhance the resistance to deformation of the pier body at the initial period of loading.

Key words: prefabricated pier; seismic performance; pseudo static test; hysteretic energy dissipation capacity; hollow interlayer

0 引言

在中国桥梁工业化发展历程中,预制装配式桥墩因具有施工速度较快、构件质量较好、对既有交通和环境影响较小等优点,其关注度越来越高,具有十分广阔的应用前景^[1-3]。

预制装配式桥墩墩身与承台连接方式主要有灌浆套筒连接、灌浆波纹管连接、承插式连接和预应力筋连接等。欧智菁等^[4]对采用灌浆套筒连接且墩底设置钢管剪力键的预制装配式桥墩进行拟静力试验,并对桥墩展开参数分析,结果表明:墩底钢管剪力键的设置明显提高了预制装配式桥墩承载能力和延性,且钢管的直径、厚度和嵌入深度的增大对桥墩

抗震性能产生积极影响。徐文靖等^[5]通过对采用灌浆套筒连接的预制装配式桥墩进行拟静力试验来分析墩底接缝受力机理及塑性铰区受力性能,结果表明:墩身预埋套筒使得墩身曲率重分布,墩身等效塑性铰高度减小。刘雪山等^[6]对不同接缝形式、耗能钢筋配筋率等的摇摆式预制拼装钢管混凝土桥墩进行拟静力试验并分析其抗震性能,结果表明:耗能钢筋的设置明显提高了桥墩的延性和耗能能力,滞后了桥墩损伤状态的出现。魏红一等^[7-8]对灌浆套筒预埋在墩身和承台的两类装配式桥墩分别进行拟静力试验,研究结果表明:不同的套筒预埋位置使得预制装配式桥墩塑性铰区形成及发展位置与桥墩最终的破坏形态有所不同。Cheng等^[9-10]对承插式装配

式桥墩进行了拟静力试验和有限元分析,结果表明:当承插深度设计合理时,装配式桥墩的抗震性能与现浇桥墩相似。Xu 等^[11]研究发现:在拟静力试验中,墩底与承台纵筋间相互搭接并锚固在超高性能混凝土(UHPC)笼中的装配式桥墩连接段上方核心混凝土大量破碎,连接段处未发生明显损伤。Qu 等^[12]研究发现:采用灌浆波纹管 and 灌浆套筒 2 种连接方式的装配式框架墩抗震性能相近,墩身损伤均较小。Ding 等^[13-14]研究发现:配置高强钢筋混凝土桥墩变形能力和承载力优于配置普通钢筋的混凝土桥墩。

为了降低预制装配式桥墩的吊装质量,实现预制装配式桥墩轻型化,针对提出的基于灌浆套筒连接的中空夹层预制装配式圆形桥墩,以超高性能混凝土作为灌浆料,设计制作了缩尺模型,对中空夹层装配式圆形桥墩试件进行拟静力试验并对其抗震性能进行分析。采用 ABAQUS 有限元分析软件建立中空夹层装配式桥墩精细化有限元模型并进行参数分析,研究参数变化对中空夹层装配式圆形桥墩的抗震性能的影响。

1 中空夹层预制装配式圆形桥墩构造

普通预制装配式桥墩体型和质量较大,运输和安装时需要特殊的交通工具及吊装机械,耗费大量的人力物力财力,且在实际工作时,墩柱核心混凝土发挥作用十分有限。针对上述问题,提出一种墩身内预埋中空夹层钢管的预制装配式圆形桥墩,构造如图 1 所示。中空夹层预制装配式圆形桥墩墩身与承台之间采用灌浆套筒连接,且灌浆套筒预埋在墩身内,灌浆套筒中灌浆料与钢筋间的咬合力和灌浆料与套筒内壁凸起环肋间的咬合力、表面摩擦力共同实现对钢筋的锚固^[15-17]。

2 试验概况

2.1 试件设计

设计 2 个采用灌浆套筒连接的预制装配式圆形桥墩试件:普通预制装配式混凝土桥墩试件(C1)和中空夹层预制装配式桥墩试件(C2)。试件尺寸如图 2 所示。

试件采用 C40 混凝土制作,纵筋、箍筋和内置钢管参数如表 1 所示,其中 C2 试件墩身内自墩底向上 600~1 700 mm 范围内预埋圆形截面中空钢管。试件材料性能参数如表 2 所示。

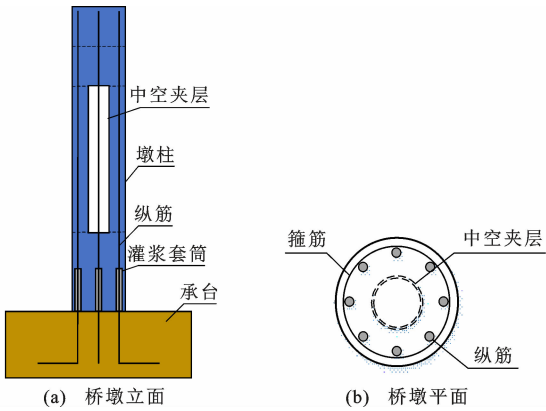


图 1 中空夹层预制装配式圆形桥墩构造
Fig.1 Structure of prefabricated circular pier with hollow interlayer

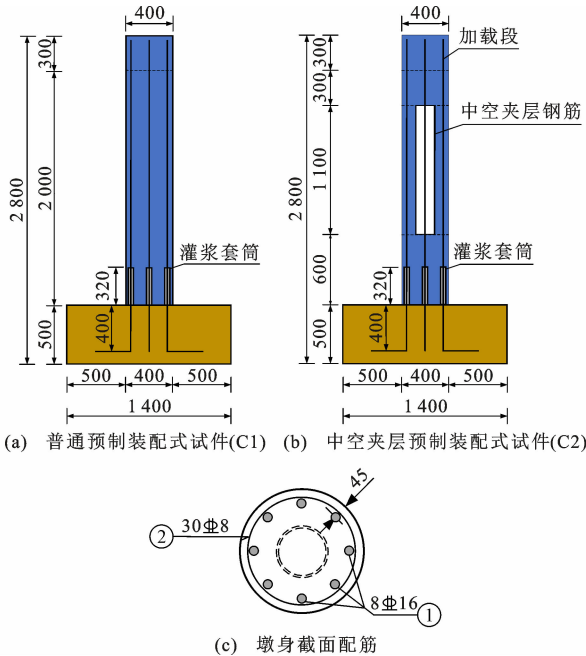


图 2 试件尺寸及截面配筋 (单位:mm)
Fig.2 Specimen sizes and section reinforcement (unit:mm)

2.2 拟静力试验加载制度

拟静力试验过程中水平方向采用作动器加载,位移控制,0~20 mm 为 2 mm 一级进行加载,20~50 mm 为 5 mm 一级进行加载,50~100 mm 为 10 mm 一级进行加载,每级荷载均持荷 3 次。试件的轴压比取 0.1,通过竖向千斤顶施加恒载,千斤顶上有滑轨以保证加载过程中轴向力中心一直位于试件中心,如图 3 所示。

2.3 试验结果分析

按照设计加载制度,对中空夹层预制装配式圆形桥墩试件和普通预制装配式圆形桥墩试件进行拟静力试验。

表 1 试件参数
Table 1 Parameters of specimens

试件编号	纵筋		箍筋		内置钢管		
	直径/mm	型号	直径/mm	型号	壁厚/mm	外径/mm	型号
C1	16	HRB400E	8	HRB400E			
C2	16	HRB400E	8	HRB400E	6	168	Q235

表 2 试验材料性能参数
Table 2 Performance parameters of test materials

材料类别	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	立方体抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
C40 混凝土	32.6		45.3	
UHPC	45.3		123.6	7.9
HRB400 钢筋	206.0	437.0		603.9
灌浆套筒	206.0	203.6		310.8
Q235 钢管	206.0	252.0		313.6



图 3 拟静力试验加载装置

Fig. 3 Quasi-static test loading device

加载初期,预埋灌浆套筒使得 C1 试件和 C2 试件灌浆套筒区段刚度明显增大,套筒顶部截面刚度发生较大突变,2 个试件首条水平贯穿裂缝均出现在该截面处,并向各自墩身中性轴水平延伸。随着荷载增大,C1 试件和 C2 试件首条裂缝上下陆续出现多条分布均匀的水平裂缝,其中加载位移为 8 mm 时,C2 试件在预埋中空钢管底部刚度变化截面产生水平贯穿裂缝。

加载后期,C1 试件和 C2 试件墩底接缝张开,墩柱套筒顶部、套筒内及接缝处主要受力纵筋陆续屈服,墩柱套筒段及刚度变化截面混凝土陆续出现起皮、剥落,墩身损伤逐渐累积,试件水平承载力逐渐下降至承载力峰值的 85%,C1 试件和 C2 试件整体破坏模式均为弯曲破坏。

通过拟静力试验,分别获得 C1 试件和 C2 试件各自相应的滞回曲线、骨架曲线和耗能曲线试验结果,如图 4~6 所示。根据两类预制装配式桥墩试件

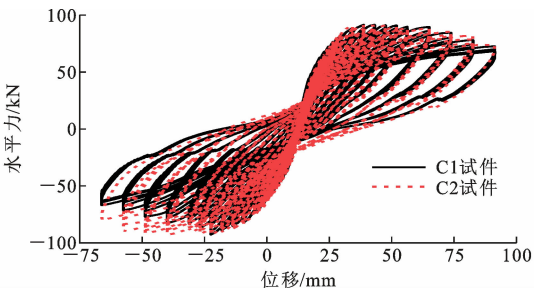


图 4 试件试验滞回曲线

Fig. 4 Test hysteresis curves of specimens

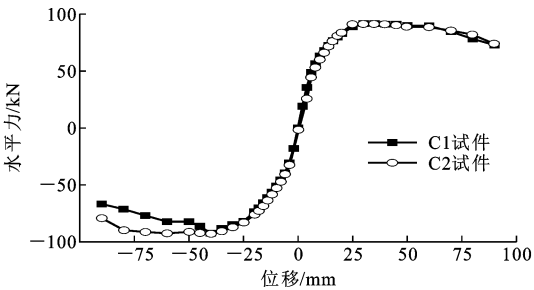


图 5 试件试验骨架曲线

Fig. 5 Test skeleton curves of specimens

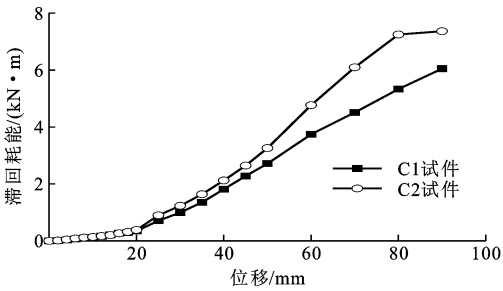


图 6 试件试验耗能曲线

Fig. 6 Test energy dissipation curves of specimens

骨架曲线,以试件最大荷载 P_{max} 的 85% 确定试件的极限荷载 P_u 和极限位移 Δ_u ,利用通用屈服弯矩法确定试件屈服位移 Δ_y 和屈服荷载 P_y ,最终得到 C1

和 C2 试件在轴压比 0.10 条件下的滞回延性系数 μ ($\mu=\Delta_u/\Delta_y$) 和初始切线刚度 K_0 , 如表 3 所示。

表 3 骨架曲线特征点参数

Table 3 Skeleton curve feature point parameters

试件编号	Δ_y/mm	P_y/kN	P_{\max}/kN	Δ_u/mm	P_u/kN	μ	$K_0/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$
C1	14.71	73.85	91.44	80.51	77.75	5.46	8 325
C2	15.93	76.56	91.25	85.12	77.56	5.34	7 791

在低周循环往复循环荷载作用下, 中空夹层预制装配式圆形桥墩荷载-位移滞回曲线滞回环较为饱满, 加载后期滞回环出现明显的梭形, 其水平承载力峰值与普通预制装配式圆形桥墩相近。

根据两类预制装配式桥墩的骨架曲线可知, 相较于普通预制装配式圆形桥墩, 预埋中空夹层钢管使得中空夹层预制装配式圆形墩身初始切线刚度减小, 屈服位移和屈服荷载分别增大约 8.3% 和 3.7%, 承载力峰值和位移延性系数变化不大。

C2 试件墩身内预埋中空夹层钢管, 发挥了钢管变形能力强的特点, 往复荷载作用下, 墩身整体变形能力也有所提高, 一定程度提高了桥墩整体耗能能力。相较于 C1 试件, C2 试件耗能能力增长快, 耗能曲线斜率较大, 耗能峰值提高约 21.9%。

3 有限元分析

3.1 有限元模型的建立

3.1.1 材料本构

在中空夹层预制装配式圆形桥墩有限元模型中, 混凝土和灌浆料等选用实体单元模拟, 钢筋选用桁架单元模拟, 中空夹层钢管和灌浆套筒选用壳单元模拟。混凝土选用损伤塑性本构, 相关参数根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[18] 和表 2 材料试验结果确定, 本构曲线见图 7, 其中, σ_c 为混凝土应力, ϵ_c 为混凝土应变, E_0 为初始弹性模量, σ_{c0} 为弹性阶段应力峰值, σ_{cm} 为非弹性阶段应力峰值, ϵ_c^{in} 为受压非弹性应变, ϵ_c^{el} 为初始刚度下的弹性应变, ϵ_c^{el} 为受压弹性应变, ϵ_c^{pl} 为受压塑性应变, d_c 为混凝土受压损伤因子。纵筋、箍筋、中空夹层钢管和套筒选用理想弹塑性双折线模型本构, 相关参数根据表 2 材料试验结果确定。

UHPC 灌浆料受压时, 简化材料本构分为上升段与下降段两部分^[19], 如式(1)所示。

$$f=\begin{cases} f_c \frac{n\xi-\xi^2}{1+(n-2)\xi} & \epsilon\leqslant\epsilon_{c0} \\ f_c \frac{n\xi-\xi^2}{2(\xi-1)^2+\xi} & \epsilon>\epsilon_{c0} \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_c 为 UHPC 受压时的抗压强度; $n=E_c/E_s$, E_c 为 UHPC 受压初始弹性模量, E_s 为 UHPC 受压

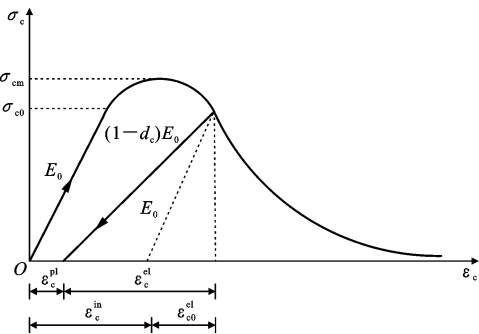


图 7 混凝土损伤塑性本构曲线

Fig. 7 Damage plastic constitutive curve of concrete

峰值点的割线模量; $\xi=\epsilon/\epsilon_{c0}$, ϵ_{c0} 为 UHPC 受压峰值点的压应变。

UHPC 灌浆料受拉时, 简化材料本构为三折线模型^[20], 如式(2)所示。

$$f=\begin{cases} E_{t1}\epsilon & 0\leqslant\epsilon\leqslant\epsilon_{te} \\ f_{te}+E_{t2}(\epsilon-\epsilon_{te}) & \epsilon_{te}<\epsilon\leqslant\epsilon_{tu} \\ f_{tu}-E_{t3}(\epsilon-\epsilon_{tu}) & \epsilon_{tu}<\epsilon\leqslant\epsilon_{ts} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{te} 和 ϵ_{te} 分别为 UHPC 材料受拉弹性阶段的抗拉强度和相应的拉应变; f_{tu} 和 ϵ_{tu} 分别为 UHPC 材料极限抗拉强度和拉应变; f_{ts} 和 ϵ_{ts} 分别为 UHPC 材料受拉软化下降段控制点抗拉强度和拉应变; E_{t1} 、 E_{t2} 、 E_{t3} 分别为 UHPC 材料受拉弹性段、强化段、软化下降段曲线切线斜率, $E_{t1}=\frac{f_{te}}{\epsilon_{te}}$, $E_{t2}=\frac{f_{tu}-f_{te}}{\epsilon_{tu}-\epsilon_{te}}$, $E_{t3}=\frac{f_{tu}-f_{ts}}{\epsilon_{ts}-\epsilon_{tu}}$ 。

3.1.2 有限元模型各部分相互作用、边界条件和网格划分

中空夹层预制装配式圆形桥墩有限元模型中钢筋骨架与混凝土实体部分采用内置区域的相互作用方式。在低周循环往复荷载作用下, UHPC 灌浆料、灌浆套筒及墩柱之间滑移可忽略不计, 故三者之间采用绑定(Tie)的相互作用方式, 墩身与预埋中空钢管间滑移也可忽略不计, 同样采用绑定(Tie)的相互作用方式。墩底与承台顶面采用表面与表面接触(Surface-to-surface)的相互作用方式, 通过设定墩底与承台顶面的切向行为选用“罚”函数, 摩擦因数为 0.5; 法向行为设定为硬接触。承台底面选择完

全固接的边界条件。中空夹层预制装配式圆形桥墩有限元模型网格划分时,混凝土和 UHPC 灌浆料划分网格类型为 C3D8R,纵筋和箍筋划分网格类型为 T3D2,中空夹层钢管和灌浆套筒划分网格类型为 S4R。普通预制装配式圆形桥墩材料本构、相互作用和边界条件与中空夹层预制装配式圆形桥墩完全一致,试件有限元模型见图 8。

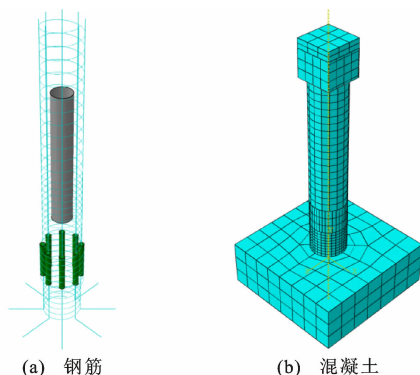


图 8 试件有限元模型

Fig. 8 Finite element model of specimen

3.2 有限元分析结果

利用 ABAQUS 有限元分析软件建立中空夹层预制装配式圆形桥墩试件有限元模型,对其进行数值模拟分析。通过对中空夹层预制装配式圆形桥墩试件有限元模型施加与试验相同的低周循环往复荷载,获得相应的荷载-位移滞回曲线和骨架曲线,并与试验结果进行拟合,以验证数值模拟结果的正确性,如图 9 和图 10 所示。

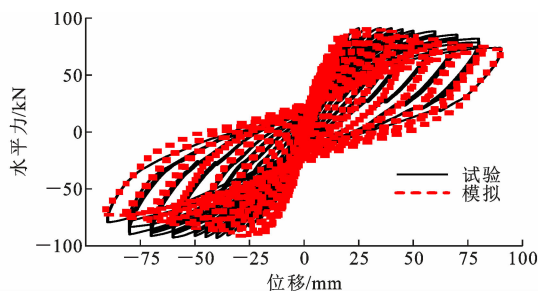


图 9 试件滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curves of specimen

由图 9 和图 10 可知,建立的中空夹层预制装配式圆形桥墩有限元模型分析结果与试验结果总体拟合效果较好。这说明所建立的中空夹层预制装配式圆形桥墩有限元模型正确性良好。

3.3 试件破坏形态

通过对中空夹层预制装配式圆形桥墩有限元模型施加低周循环往复荷载,获得其在整个加载过程中桥墩墩身破坏形态的发展历程,并与试验现象进

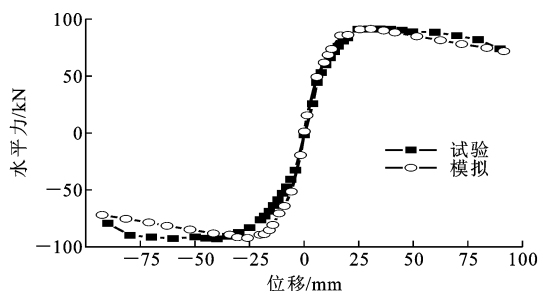


图 10 试件骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves of specimen

行对比分析。根据桥墩墩身破坏的严重程度分为 3 个阶段:轻微损伤阶段、中等损伤阶段和严重损伤阶段,通过有限元模型 DAMAGEC 云图和 DAMAGEC 云图来表征,并与试验图片相对照。中空夹层预制装配式圆形桥墩有限元模型在不同加载阶段时的破坏形态及相应试验图片如图 11 所示。

轻微损伤阶段:当加载位移为 20 mm 时,中空夹层预制装配式圆形桥墩墩身自墩底向上约 900 mm 范围内混凝土出现受拉破坏,墩身产生裂缝,主要受力纵筋逐渐达到屈服,随着荷载增大,破坏区域继续扩展。实际试验中,往复荷载作用下,墩身刚度变化截面及墩底截面首先出现水平贯穿裂缝,且裂缝开展较快,随着荷载增大,墩身上下陆续出现多条水平裂缝,主要受力纵筋达到屈服。

中等损伤阶段:当加载位移为 60 mm 时,灌浆套筒的存在使得中空夹层预制装配式圆形桥墩墩身在墩柱底部向上 320 mm 范围内刚度增大,从而使套筒顶部墩柱截面出现较大的刚度突变,从而导致塑性铰明显上移,墩底和套筒顶部两个截面部分混凝土几乎同时出现压缩损伤,部分混凝土受压破坏,且塑性铰区不断扩展。实际试验中,墩身在套筒顶部及墩底 2 个截面处陆续出现混凝土保护层起皮、剥落,且剥落范围逐渐扩展。

严重损伤阶段:当加载位移为 90 mm 时,中空夹层预制装配式圆形桥墩墩底至预埋中空钢管底部区段内墩身混凝土几乎全部达到极限压应变,混凝土压缩损伤充满整个区段,墩底混凝土被压碎。实际试验中,加载后期,墩身套筒区段混凝土大面积剥落,墩身裂缝开展十分明显,开展宽度较大,墩底接缝张开,墩身损伤累积较多。

4 抗震性能影响参数分析

为进一步研究中空夹层预制装配式圆形桥墩的抗震性能,以 C2 试件为基准,开展参数敏感性分析,研究不同参数对中空夹层预制装配式圆形桥墩

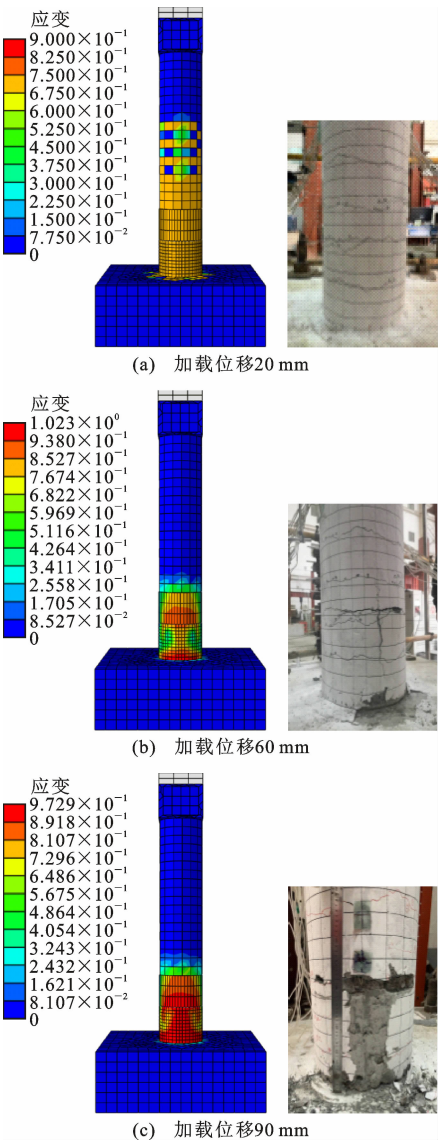


图 11 试件破坏形态

Fig. 11 Failure mode of specimen

表 4 不同轴压比下骨架曲线特征点参数

Table 4 Skeleton curves feature point parameters of specimens under different axial compression rates

轴压比	Δ_y/mm	P_y/kN	P_{\max}/kN	Δ_u/mm	P_u/kN	μ	$K_0/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
0.1	15.64	79.53	91.39	82.53	77.68	5.28	7 838
0.2	12.65	88.53	107.92	55.97	91.73	4.42	8 997
0.3	15.03	99.80	122.05	63.99	103.74	4.25	9 702

4.2 中空率

以 C2 试件为基准,在预埋中空钢管直径和厚度不变的前提下,通过改变中空钢管的高度来改变中空夹层预制装配式圆形桥墩墩身中空率,使中空率由 9.7% 增大为 14.8% 和 17.6%,不同中空率试件及内置中空钢管参数见图 13 和表 5。通过对不同中空率的中空夹层预制装配式圆形桥墩有限元模型施加相同的低周循环往复荷载,获得相应的骨架曲线和骨架曲线特征点参数,见图 14 和表 6。

抗震性能的影响。

4.1 轴压比

实际工程中,桥墩大多处在低轴压比状态,轴压比一般维持在 0.1 左右。为研究轴压比中空夹层预制装配式圆形桥墩抗震性能的影响,将 C2 试件有限元模型的轴压比 n 分别取 0.1、0.2、0.3,其他参数均与 C2 试件保持一致,获得不同轴压比下中空夹层预制装配式圆形桥墩有限元模型的骨架曲线和相应的特征点参数,见图 12 和表 4。

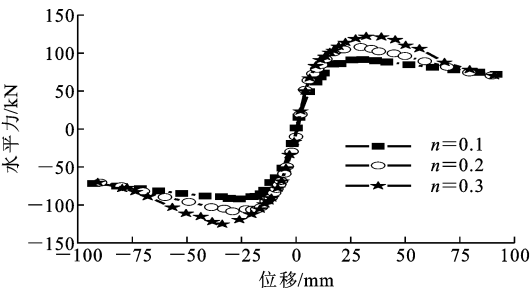


图 12 不同轴压比下试件骨架曲线

Fig. 12 Skeleton curves of specimens under different axial compression rates

根据图 12 和表 4 可知,随着轴压比的增大,中空夹层预制装配式圆形桥墩骨架曲线总体趋势相似。相较于轴压比 0.1,轴压比取 0.2 和 0.3 时的试件水平承载力峰值分别增大了 18.08% 和 33.54%,水平承载力峰值增长明显。随着轴压比的增大,中空夹层预制装配式圆形桥墩墩位移动延性系数和初始切线刚度分别有较大幅度的减小和较大幅度的增大,相较于轴压比 0.1 时,轴压比取 0.2 和 0.3 时试件位移延性系数分别降低了 15.28% 和 19.50%,初始切线刚度分别增大了 14.79% 和 23.78%。

根据图 14 和表 6 可知,随着中空夹层预制装配式圆形桥墩墩身中空率的增大,其骨架曲线总体趋势相近。相较于中空率 9.7%,中空率为 14.8% 和 17.6% 时空空夹层预制装配式圆形桥墩水平承载力峰值分别增大了 15.0% 和 25.0%,墩身初始切线刚度分别增大了 10.6% 和 36.5%,位移延性系数分别减小了 2.08% 和 3.4%,对其影响不大,说明墩身中空率的增大一定程度上提高中空夹层预制装配式圆形桥墩的水平承载能力,提高了中空夹层预制装

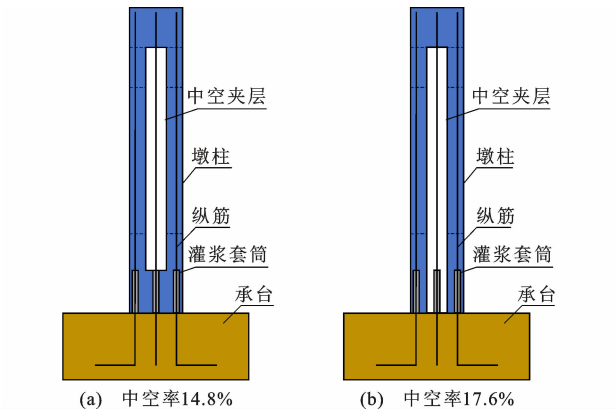


图 13 不同中空率试件示意图

Fig. 13 Schematic diagram of specimens with different hollow rates

表 5 内置中空钢管参数

中空率/%	钢管外径/mm	钢管长度/mm	钢管厚度/mm
9.7	168	1 100	6
14.8	168	1 690	6
17.6	168	2 000	6

表 6 不同中空率试件骨架曲线特征点参数

中空率/%	Δ_y /mm	P_y /kN	P_{max} /kN	Δ_u /mm	P_u /kN	μ	K_0 /(kN · m ⁻¹)
9.7	15.64	79.53	91.39	82.53	77.68	5.28	7 838
14.8	14.36	81.55	105.10	74.24	89.34	5.17	8 671
17.6	14.01	90.57	114.24	71.43	97.10	5.10	10 702

实桥中空夹层预制装配式圆形截面实桥桥墩构造尺寸如图 15 所示。

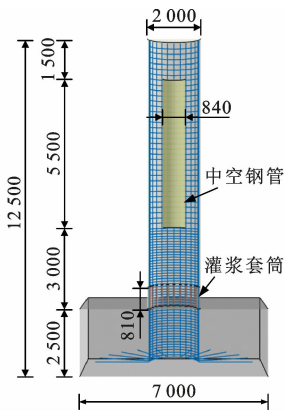


图 15 实桥中空夹层预制装配式圆形桥墩构造尺寸
(单位:mm)

Fig. 15 Structure size of actual prefabricated circular pier with hollow interlayer (unit:mm)

5.2 加载制度

基于 ABAQUS 有限元分析软件,建立中空夹层预制装配式圆形截面实桥桥墩的有限元模型,且

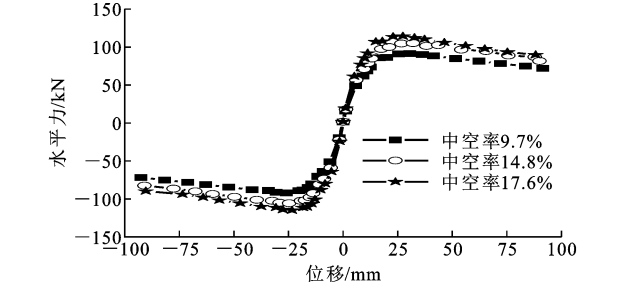


图 14 不同中空率试件骨架曲线

Fig. 14 Skeleton curves of specimens with different hollow rates

装配式圆形桥墩在加载初期墩身的抗变形能力,但对其位移延性影响较小。

5 抗震性能分析

5.1 构造尺寸

根据中空夹层预制装配式圆形桥墩(C2 试件)设计尺寸,将中空夹层钢管预埋至实际工程的预制装配式圆形截面桥墩墩身内,使得预制装配式圆形截面实桥桥墩的墩身中空率与C2试件保持一致,

对其施加低周循环往复荷载,使得中空夹层预制装配式圆形实桥桥墩在往复荷载作用下的墩顶漂移率与拟静力试验中 C2 试件的墩顶漂移率保持一致,加载制度如图 16 所示。

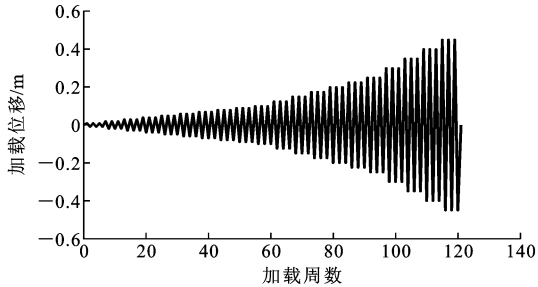


图 16 加载制度

Fig. 16 Loading system

5.3 有限元分析结果

通过对中空夹层预制装配式圆形实桥桥墩有限元模型施加低周循环往复荷载,获得相应的滞回曲线和骨架曲线,如图 17 所示。

根据图 17 可知,在低周循环往复荷载作用下,中空夹层预制装配式圆形实桥桥墩墩身材料逐渐由

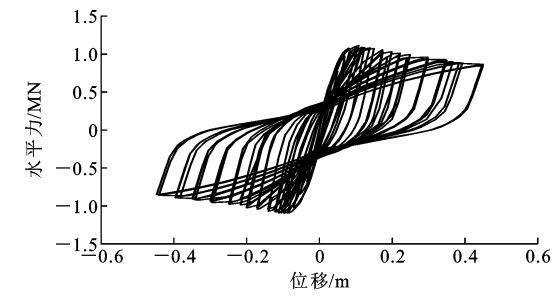


图 17 实桥桥墩滞回曲线

Fig. 17 Hysteresis curve of actual pier

弹性阶段进入弹塑性阶段,桥墩滞回曲线斜率逐渐减小,滞回环面积逐渐增大,耗能能力逐渐增强。

根据图 18 和表 7 可知,中空夹层预制装配式圆形实桥桥墩骨架曲线整体趋势分为上升段、强化段和下降段。加载初期,中空钢管的加入使得桥墩墩身刚度较大,墩身塑性变形较少,水平抗弯承载力增长迅速。随着荷载不断增大,桥墩主要纵筋达到屈服强度,墩身损伤逐渐累积,墩身刚度逐渐退化,水平抗弯承载力达到其峰值后逐渐下降。综上所述,在低周循环往复荷载作用下,实桥中空夹层预制装配式圆形桥墩滞回曲线滞回环较为饱满,具有较高的水平抗弯承载力,中空夹层钢管对其抗震性能产生积极影响,桥墩位移延性系数大于 5,满足工程抗震要求,整体抗震性能优良。

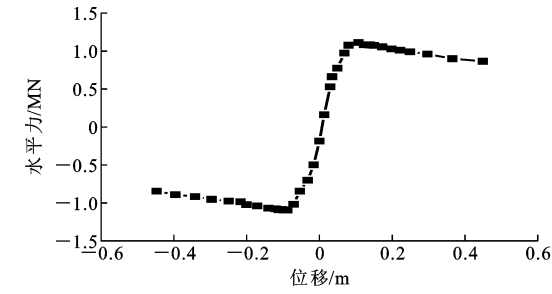


图 18 实桥桥墩骨架曲线

Fig. 18 Skeleton curve of actual pier

表 7 实桥桥墩骨架曲线特征点参数

Table 7 Skeleton curve feature point parameters of actual pier						
$\Delta y/m$	P_y/kN	P_{max}/kN	$\Delta u/m$	P_u/kN	μ	$K_0/(kN \cdot m^{-1})$
0.05	804.51	1 111.96	0.32	945.17	6.40	22 716

6 结 语

(1)在低周循环往复荷载作用下,中空夹层预制装配式圆形桥墩滞回环较为饱满,加载后期呈现明显的梭形,抗震性能良好。相较于普通预制装配式圆形桥墩,预埋中空夹层钢管使得中空夹层预制装配式圆形桥墩屈服位移和屈服荷载均分别增大约

8.3%和 3.7%,墩身初始切线刚度减小,提高墩身变形能力,有利于桥墩耗能。

(2)随着轴压比的增大,中空夹层预制装配式圆形桥墩水平承载力峰值增长明显。相较于轴压比 0.1,轴压比为 0.2 和 0.3 时试件位移延性系数分别减小了 15.28%和 19.50%,初始切线刚度分别增大了 14.79%和 23.78%,说明轴压比的增大降低了中空夹层预制装配式圆形桥墩的位移延性,增大了加载初期墩身的刚度,降低了加载初期墩身的变形能力。

(3)墩身中空率的增大,使得中空夹层预制装配式桥墩水平承载力峰值增大。相较于中空率 9.7%,中空率为 14.8%和 17.6%时,试件水平承载力峰值分别增大了 15.0%和 25.0%,墩身初始切线刚度分别增大了 10.6%和 36.5%,位移延性系数变化不大。这说明中空夹层钢管体积增大,可一定程度上提高中空夹层预制装配式圆形桥墩墩身的刚度,提高其水平承载力,对其位移延性影响微乎其微。

(4)在往复荷载作用下,中空夹层预制装配式圆形实桥桥墩滞回曲线滞回环较为饱满,具有良好的耗能能力。实桥桥墩墩身内预埋中空钢管,使得中空夹层预制装配式圆形实桥桥墩墩身具有较大的抗弯刚度,提高桥墩抗侧极限承载能力,使桥墩具有较好的水平抗弯承载力,整体抗震性能良好。

参考文献:

References:

[1] 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 aseismic behavior of precast piers: new material, new concept, and new application[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 1-23.

[2] SHIM C S, LEE S Y, PARK S J, et al. Experiments on prefabricated segmental bridge piers with continuous longitudinal reinforcing bars [J]. Engineering Structures, 2017, 132: 671-683.

[3] LI T T, QU H Y, WANG Z Q, et al. Seismic performance of precast concrete bridge columns with quasi-static cyclic shear test for high seismic zones[J]. Engineering Structures, 2018, 166: 441-453.

[4] 欧智菁,谢铭勤,秦志清,等. 带钢管剪力键的装配式混凝土桥墩抗震性能[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1169-1175, 1191.
OU Zhijing, XIE Mingqin, QIN Zhiqing, et al. Seismic

- performance test and FEM analysis of assembled concrete pier with sleeve and steel tube shear connector [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1169-1175, 1191.
- [5] 徐文靖, 马 磊, 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 Wenjing, MA Biao, HUANG Hong, et al. The seismic performance of precast bridge piers with grouted sleeves [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 93-104.
- [6] 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.
- [7] 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 Hongyi, XIAO Wei, WANG Zhiqiang, 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.
- [8] 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 Zhiqiang, WEI Zhangzhen, WEI Hongyi, 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.
- [9] CHENG Z, LIU D, LI S, et al. Performance characterization and design recommendations of socket connections for precast columns[J]. Engineering Structures, 2021, 242: 112537.
- [10] ZHANG G D, HAN Q, XU K, et al. Experimental investigation of seismic behavior of UHPC-filled socket precast bridge column-foundation connection with shear keys [J]. Engineering Structures, 2021, 228: 111527.
- [11] XU W J, MA B, DUAN X Z, et al. Experimental investigation of seismic behavior of UHPC connection between precast columns and footings in bridges[J]. Engineering Structures, 2021, 239: 112344.
- [12] 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.
- [13] DING Y, WU D Q, SU J S, et al. Experimental and numerical investigations on seismic performance of RC bridge piers considering buckling and low-cycle fatigue of high-strength steel bars [J]. Engineering Structures, 2021, 227: 111464.
- [14] SU J S, LI Z X, WANG J J, et al. Numerical simulation and damage analysis of RC bridge piers reinforced with varying yield strength steel reinforcement [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 130: 106007.
- [15] 郑永峰, 郭正兴, 曹 江. 新型灌浆套筒的约束机理及约束应力分布[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(12): 106-111.
- ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing, CAO Jiang. Confinement mechanism and confining stress distribution of new grouting coupler for rebars splicing[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(12): 106-111.
- [16] ZHENG Y F, GUO Z X, GUAN D Z, et al. Parametric study on a novel grouted rolling pipe splice for precast concrete construction[J]. Construction and Building Materials, 2018, 166: 452-463.
- [17] 郑永峰, 郭正兴, 张 新. 套筒内腔构造对钢筋套筒灌浆连接黏结性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 158-166.
- ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing, ZHANG Xin. Effect of sleeve inner cavity structure on bond performance of grouted pipe splice[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(9): 158-166.
- [18] 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.
- [19] 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.
- YANG Jian, FANG Zhi. Research on stress-strain relation of ultra high performance concrete [J]. Concrete, 2008(7): 11-15.
- [20] 赵 卓, 耿佳硕, 王建强. 采用 UHPC 材料连接的装配式桥墩抗震性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(2): 13-18.
- ZHAO Zhuo, GENG Jiashuo, WANG Jianqiang. Study on seismic performance of prefabricated pier connected by UHPC [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(2): 13-18.