

可更换耗能波纹钢板拼装桥墩抗震性能试验

金双双^{1,2}, 周诗好², 万孝², 周建庭¹

(1. 重庆交通大学 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 基于耗能集中和可更换的设计理念, 提出了一种外置可更换波纹钢板-内嵌钢管榫卯的预制节段拼装桥墩结构形式。为研究节段拼装桥墩的可更换性能, 设计了外置波纹钢板、外置开孔波纹钢板两组预制节段桥墩模型试件, 一组直接采用拟静力往复加载试验; 另一组先进行低周疲劳加载, 更换耗能钢板后再进行拟静力破坏试验。通过对比两组桥墩的破坏过程、耗能能力、承载力等评估桥墩的抗震性能及可更换性能。研究表明: 与外置波纹钢板相比, 外置开孔波纹钢板与其预埋件的设计承载力更为匹配, 虽然削弱了钢板的强度和刚度, 但其耗能能力更优; 因桥墩底部耗能主要集中于外置耗能钢板, 试验前、后底部混凝土节段未出现压溃破坏; 外置开孔波纹钢板桥墩在设计目标偏移率下具有良好的可更换性能。

关键词: 节段拼装桥墩; 波纹钢板; 拟静力试验; 可更换性; 滞回性能

中图分类号: U443.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)03-0746-12

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241011

Experiment on seismic performance of assembled piers with energy dissipation of replaceable corrugated steel plates

JIN Shuang-shuang^{1,2}, ZHOU Shi-yu², WAN Xiao², ZHOU Jian-ting¹

(1. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on the concept of energy intensive and replaceable design, a segmental assembled pier with external replaceable corrugated steel plate and embedded steel pipe tenon and mortise is proposed. To verify the replaceability of prefabricated bridge piers, specimens with corrugated steel plates and perforated corrugated steel plates were designed and manufactured, respectively. The quasi-static cyclic loading test was carried out on one specimen. The fatigue loading test was conducted on the other one. After the test, the damaged corrugated steel plate was replaced by a new one, and then a quasi-static reciprocating loading test was conducted again. The seismic performance and replaceability of the pier were evaluated by comparison of the damage process, energy dissipation capacity, bearing capacity. The results show that

收稿日期: 2024-09-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078092); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2022NSCQ-LZX0047)

作者简介: 金双双(1986-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 结构抗震及性能提升. E-mail: jinshuangshuang@cqjtu.edu.cn

通信作者: 周建庭(1972-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 桥梁状态感知与监测、评估及性能提升.

E-mail: jzzhou@cqjtu.edu.cn

external perforated corrugated steel plates have a better matching design bearing capacity with embedded parts compared with external corrugated steel plates. Although the strength and stiffness of the steel plate were reduced, the energy consumption capacity is better. Since the energy consumption of the bottom pier is mainly concentrated on the external corrugated steel plate, there is no crushing failure and damage of the bottom concrete section before and after the test. The external corrugated steel plate can achieve replaceable performance under the design target drift ratio.

Key words: precast assembled pier; corrugated steel plate; pseudo-static testing; replaceability; hysteretic behavior

0 引言

装配式桥梁由于施工效率高、对环境的污染小,近年来其发展和设计研究受到越来越多关注^[1,2]。从目前国内外装配式桥梁的工程应用情况来看,桥梁上部结构的预制拼装化应用率是最高的,而桥梁下部结构中的桥墩预制拼装的发展和工程应用仍然处于发展和研究中。从桥梁结构抗震角度来看,桥梁上部结构在地震作用下主要发生整体刚性位移,破坏可控;但桥墩在竖向承重和直接受地面运动激励的情况下,震后破坏和修复难度往往较大,严重影响震后抗震救灾。目前,越来越多的实际工程采用了节段拼装桥墩,如何提升节段拼装桥墩的整体抗震性能和震后恢复功能成为了桥梁设计工作的重点^[3-5]。

桥墩的预制拼装技术较早出现于1997年Mander等^[6]提出的预应力预制拼装桥墩,通过采用预应力钢绞线连接整体;为提高预制拼装桥墩的抗震性能,Hewes等^[7]对桥墩底部节段采用外包钢管的形式,增强了桥墩试件的耗能能力,并降低了底部混凝土剥落损伤;Chou等^[8]采用全节段外包钢管形成钢管混凝土节段拼装桥墩形式,并在底部节段增设耗能阻尼器,不仅增强结构的耗能,同时避免了塑性铰上移造成上部节段混凝土损伤严重;王文炜等^[9]在墩底外侧设置耗能钢板,通过进行拟静力对比分析外置耗能钢板预制拼装桥墩的抗震性能,得出增加耗能钢板用量可以提高桥墩的承载力和刚度;Ou等^[10-12]采用在桥墩节段内部增设耗能钢筋的方式用以提高桥墩的耗能能力、承载力等。学者们的研究有效地提升了节段拼装桥墩的抗震性能,提高预制拼装桥墩在中、高烈度地震区的适用性能,然而在极端荷载作用下,桥墩势必会产生较大的损伤,影响结构的震后修复。

近年来,桥梁抗震设计理念逐渐从抗震减震转变为损伤可控、震后可修复,为进一步提高桥墩抗震性能,同时便于震后修复,国内外学者^[13-20]考虑在拼装桥墩墩底区域附加耗能阻尼器来增加桥墩的耗能能力,同时外置阻尼器使预制拼装桥墩耗能部件更易更换。Eigawady等^[13]通过增设角钢阻尼器提高了试件耗能能力;孙治国等^[14]对提出的外置角钢阻尼器和接缝处内置耗能钢筋的双柱式自复位拼装桥墩进行数值模拟,结果表明试件整体具有较好的抗震性能;Marriott等^[15,16]在整体式预制装配式桥墩底部安装外置耗能阻尼器,使试件能够实现稳定的能量耗散;Guerrini等^[17,18]在桥墩内部设置了穿过底部接缝的耗能钢筋和外置耗能阻尼器,这些装置提供了良好的耗能能力,且外置耗能阻尼器易于更换,有利于震后修复;贾俊峰等^[19]设计了外置可更换耗能装置的自复位预制拼装桥墩,其装置耗能效果明显,更换耗能部件前后试件承载力和耗能性能基本一致;赵建锋等^[20]提出了一种外置可更换耗能装置的节段拼装钢管混凝土桥墩,与未设置耗能装置的桥墩相比,该类桥墩的侧向承载力、初始刚度和耗能能力有明显提高。上述学者对外置可更换耗能元件的节段拼装桥墩的耗能能力进行了一系列研究,但对可更换耗能元件的参数设计及震后更换的可行性研究较少。

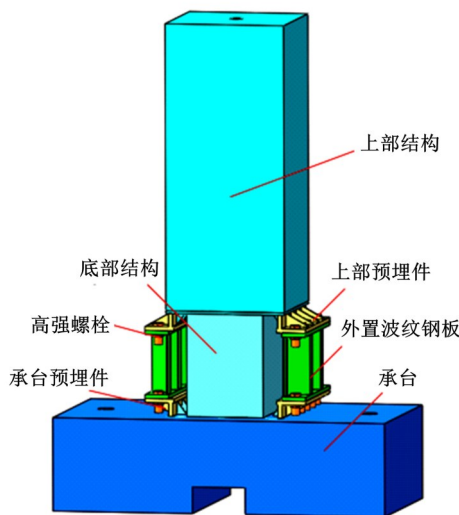
结合上述研究,为了提高节段拼装桥墩耗能装置的可更换性与抗震性能,本课题组基于耗能集中和可更换的理念,提出一种新型的外置波纹钢板-内嵌钢管榫卯的预制节段拼装桥墩:以外置波纹钢板作为墩底塑性铰区集中耗能装置,内嵌钢管榫卯作为节段间的抗剪连接件。基于此,分别设计制作了以波纹钢板和开孔波纹钢板为耗能元件的预制拼装桥墩试件模型,并采用拟静力循

环加载方式对其抗震性能和可更换性能进行研究,探讨了波纹钢板截面抗力比对节段拼装桥墩抗震性能、耗能能力以及震后修复可行性的影响。

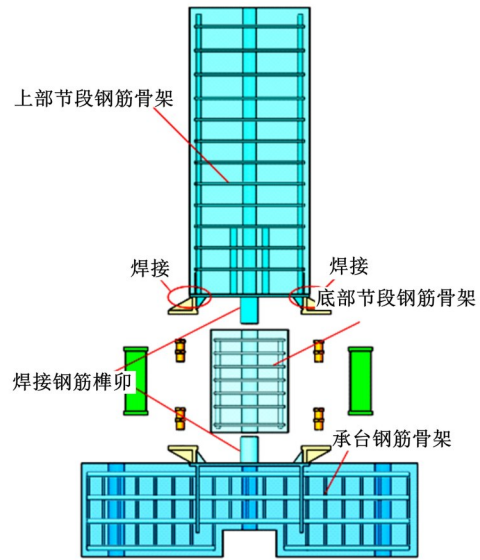
1 外置波纹钢板拼装桥墩构造

外置波纹钢板拼装桥墩由承台、底部节段、上部节段、预埋件及波纹钢板 5 个部分组成。预埋件分为承台内预埋件和上部节段预埋件;上部节段预埋件主要由竖向焊接连接板、预埋平钢板、开孔 L 形连接件及焊接钢管榫卯组成;承台内预埋件主要由竖向焊接开孔连接板、预埋平钢板、开孔 L 形连接件及焊接钢管榫卯组成,以上各部件均通过焊接的方式连接。耗能钢板主要由开孔连接板和波纹板组成,承台内的横向受力主筋部分横穿承台预埋件的竖向焊接开孔连接板,并与承台现浇成为一个受力体;上部节段内的竖向受力主筋与上部节段预埋件的竖向焊接连接板焊接在一起,并与上部节段现浇成为一个受力体。

为体现出节段拼装桥墩不同于整体现浇桥墩的构造,本文将桥墩墩身划分为上、下两个节段,通过内嵌钢管榫卯作为节段间的抗剪连接件使墩身连接为整体。波纹钢板与承台预埋件及上部节段预埋件之间的连接方式通过开孔 L 形连接件和开孔连接板,采用竖向高强度螺栓连接,从而使得上部结构的荷载通过波纹板传递至下部结构。外置波纹钢板拼装桥墩的连接构造详图如图 1 所示,为适用双向地震作用,波纹钢板沿墩底一圈布置,为清晰看出构造,图中未完整展示。



(a)构造整体示意图



(b)构造细部示意图

图 1 外置波纹钢板拼装桥墩连接构造示意图

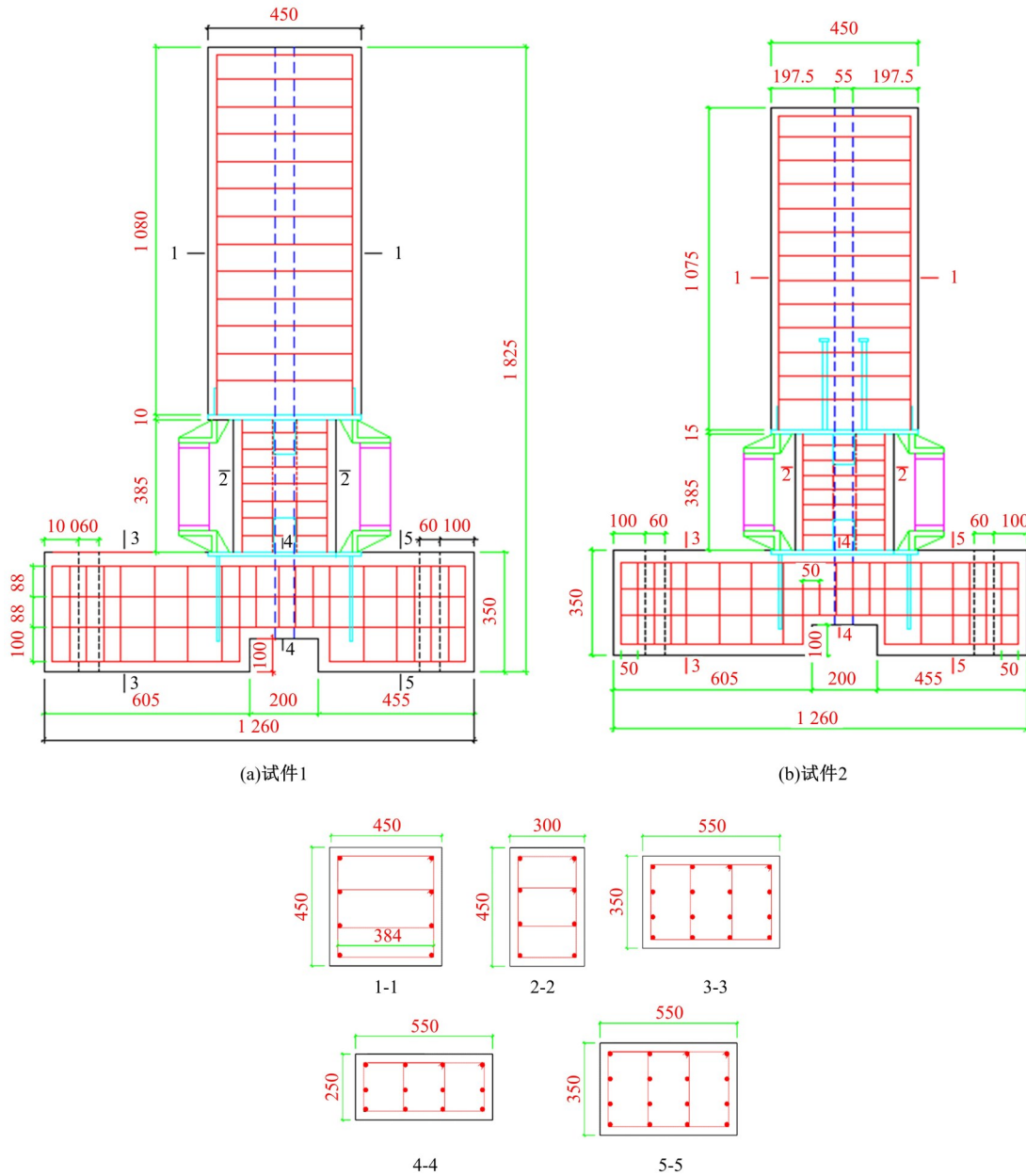
Fig. 1 Schematic diagram of connection structure for assembled pier with external corrugated steel plates

2 试验设计

2.1 试件设计与制作

为研究拼装桥墩的破坏模式、耗能能力和可更换性能,设计制作了外置波纹钢板、外置开孔波纹钢板两组预制节段拼装桥墩试件。试件选用两节段预制拼装形式,上部节段高度为 1 090 mm,截面尺寸为 450 mm×450 mm;下部节段高度为 385 mm,截面尺寸为 300 mm×450 mm;承台高度为 350 mm,截面尺寸为 1 260 mm×550 mm;预制节段间、节段与承台间设置内嵌圆钢管榫卯便于连接固定和传递剪力,其长度为 100 mm,直径为 50 mm,壁厚为 2.5 mm。试件尺寸如图 2 所示。

考虑到预埋件部分震后不易更换,设置成非更换部件,外置耗能波纹板为可更换部件。为研究可更换部件与非更换部件间的合理匹配关系,定义参数截面抗力比,即预埋件截面抵抗弯矩与耗能部件的抵抗弯矩之比。为研究截面抗力比对拼装桥墩的可更换性能的影响,试件 1 选用 450×225×3.5 的波纹钢板作为耗能部件,按照截面抗力比为 1 进行预埋件部分设计;试件 2 选用设置 3 排 15 个直径 30 mm 圆孔的同尺寸开孔波纹钢板作为耗能部件,按照截面抗力比为 1.68 进行预埋件部分设计。



(c) 试件截面配筋图

图 2 试件尺寸构造(单位:mm)

Fig. 2 Details of specimens(units: mm)

根据截面抗力比不同设计预埋件部分的具体参数:试件 1 和试件 2 中承台预埋件的竖向焊接开孔连接板厚度为 10 mm,预埋平钢板厚度分别为 10 mm 和 15 mm,开孔 L 形连接件厚度分别为 15 mm 和 18 mm,三角形加劲肋厚度均为 8 mm;试件 1 和试件 2 中上部节段预埋件的竖向焊接连接板厚度均为 5 mm,长度均为 80 mm,预埋平钢板厚度分别为 10 mm 和 15 mm,开孔 L 形连接件厚度分别为 15 mm 和 18 mm,加劲肋不变;在开孔 L 形连接件及波纹钢板的连接板上各自开孔,

通过 10.9 级的 20 个 M27 螺栓连接。试件主要参数如表 1 所示。

为了验证拼装桥墩的可更换性,对截面抗力比为 1 的试件 1 直接进行拟静力往复加载试验;对抗力比为 1.68 的试件 2 首先进行一次疲劳加载试验后更换新的开孔波纹钢板,再进行拟静力往复加载试验。为了便于区分不同的加载试验,将试件 2 按照不同加载方法分别编号为试件 2-1 及试件 2-2。

表 1 试件主要参数

Table 1 Main Parameters of Test Specimens

试件	编号	竖向焊接开孔连接板厚度/mm		开孔 L 形连接件厚度/mm		钢管榫卯尺寸/mm		加载制度
		承台	上部节段	承台	上部节段	长度	厚度	
1	—	10	5	15	15	100	2.5	滞回加载
2	1	10	5	18	18	100	2.5	疲劳加载
	2							滞回加载

按照前述设计的尺寸先在工厂进行钢结构部分的加工制作,主要包括外置波纹钢板、上部节段内预埋件和承台内预埋件。钢结构部分完成加工和制作后运输回实验室进行后续混凝土施工作业。部分结构的制作与加工如图 3(a)所示。待混凝土浇筑完成后第三天进行试件模板的拆除,并运输至养护场所进行混凝土养护,图 3(b)为试件制作及安装的大体流程,图 4 为部分试验装置实拍图。



(a)制作与加工



(b)试件安装流程

图 3 试件制作与安装过程

Fig. 3 Manufacture and installation of specimen

2.2 材性试验

采用设计强度等级为 C40 的混凝土,通过制作试块材性试验测得其立方体抗压强度平均值为 41.53 MPa,轴心抗压强度平均值为 27.77 MPa,弹性模量为 32.86 GPa。

试件中钢筋采用直径为 16 mm 的 HRB400 级钢筋,箍筋采用直径为 8 mm 的 HPB300 级钢筋,波纹钢板采用 3.5 mm 厚 Q235 钢材,其余钢材均采用 Q345 钢材。

钢材的力学性能如表 2 所示。

2.3 测量方案及加载制度

试验的加载装置如图 5 所示,试件承台通过两个固定锚杆与钢制底座连接,且在两端与钢制底座之间放置 2 个 20 t 的千斤顶以防止承台滑

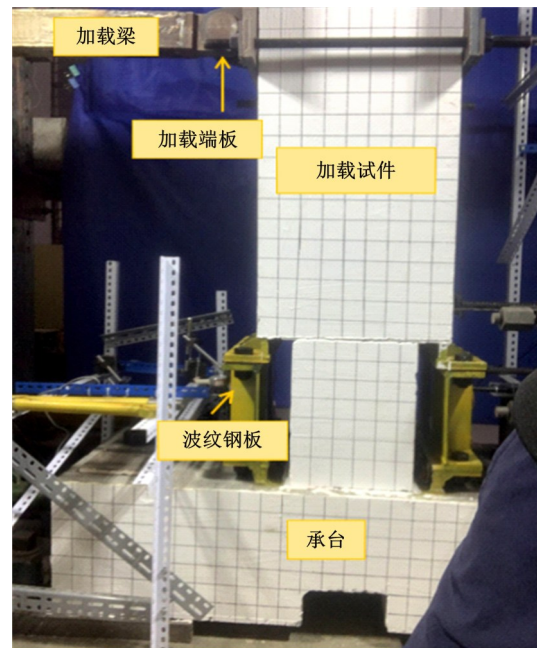


图 4 部分试验装置实拍图

Fig. 4 Test device

表 2 钢材力学性能

Table 2 Properties of steel material

钢材	等级	直径或厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
纵筋	HRB400	16	429	579
箍筋	HPB300	8	563	630
钢板	Q235	3.5	296.6	422.5

动。钢制底座与实验室地板通过 4 个地锚螺栓连接固定。水平荷载通过 150 t、量程 ±150 mm 的拉压千斤顶施加,且在千斤顶加载头附近设置约束支撑,限制千斤顶的面外变形,保证平面内加载。为测得在加载过程中的位移响应,试件共布置了 8 个位移计(见图 6)。其中,位移计 2 与位移计 6 的差值作为试件加载控制水平位移。

试验采用两阶段控制加载制度,分别是力控制和位移控制。第一阶段:以偏移率 0.1% 作为力控制和位移控制的分界点,力控制以 5 kN、10 kN、15 kN 依次递增,每级加载一圈直至位移达到 0.1% 的偏移率后转为位移控制加载。在力控制加载的过程中检测仪器设备是否正常工作,并对

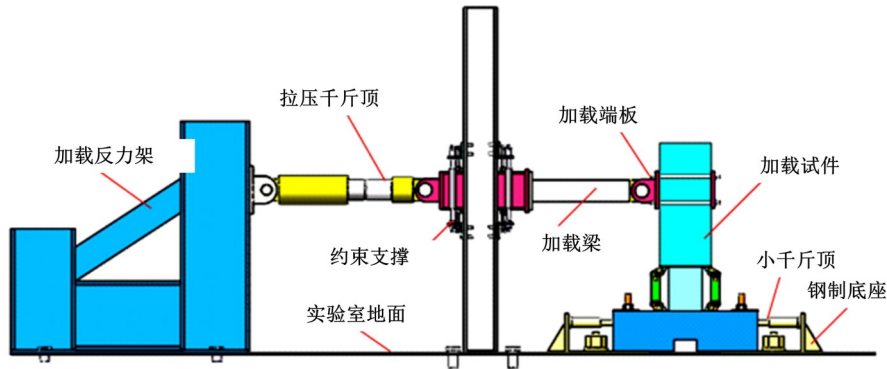


图 5 试验加载装置图

Fig. 5 Test loading device drawing

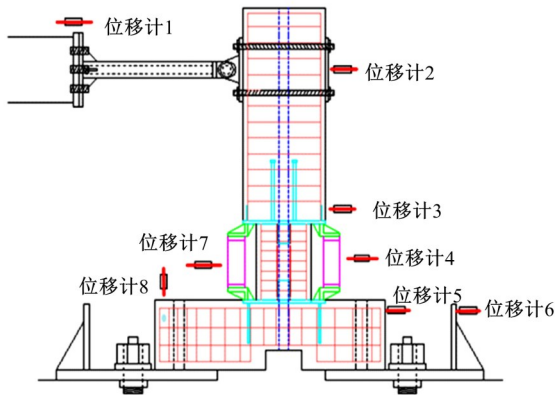


图 6 位移计布置位置

Fig. 6 Position of strain gauges in specimen

钢制底座上两个防止试件滑动的小千斤顶进行二次拧紧。第二阶段:基于位移的控制加载,每一个加载等级循环加载 2 圈。试件 1 在 2% 偏移率之前以 0.2% 的偏移率递增,后续以 0.5% 的偏移率递增,直至试件的承载力下降至 80% 以下结束试验,如图 7 所示。

试件 2-1 在 2% 偏移率之前以 0.2% 的偏移率递增,后续在 2% 偏移率进行低周疲劳加载试验,直至试件的承载力下降至 80% 以下结束试验;对试件 2-1 进行更换和修复,对更换耗能钢板

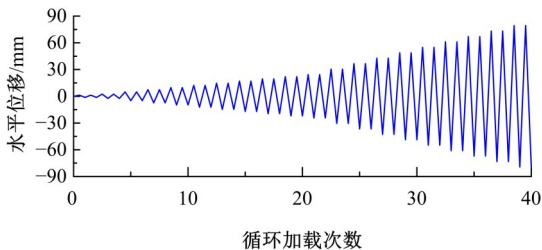
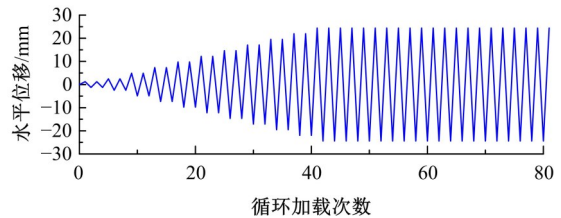


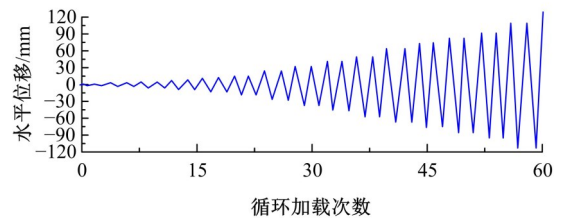
图 7 试件 1 加载制度

Fig. 7 Loading process of specimen 1

后的试件 2-2 采用与试件 1 相同的加载制度,如图 8 所示。



(a)试件 2-1 疲劳加载制度



(b)试件 2-2 拟静力加载制度

图 8 试件 2 加载制度

Fig. 8 Loading process of specimen 2

3 试验现象分析

3.1 试件 1

试件 1 在墩顶位移加载至 24.4 mm (偏移率 2%) 时,上部节段两侧面出现对称的横向贯通小裂缝;墩顶位移加载至 30.5 mm (偏移率 2.5%) 时,上部节段预埋件四角处的斜向裂缝发展已较大,并与侧面横向裂缝有相互连通的趋势,斜向裂缝整体呈倒八字形;墩顶位移加载至 36.6 mm (偏移率 3%) 时,上部节段侧面出现第二条横向裂缝,随着加载位移的增大,横向裂缝有向上发展的趋势;墩顶位移加载至 67.1 mm (偏移率 5.5%) 时,承台正面竖向裂缝往两侧发展,上部节段侧面

横向裂缝宽度已达 2 mm,底部节段抬起高度达到 12 mm;墩顶位移加载至 79.3 mm(偏移率 6.5%)时,倒八字形裂缝开裂至最大宽度为 7mm 左右,底部节段损伤较轻,无明显裂缝,最终损伤状态如图 9 所示。

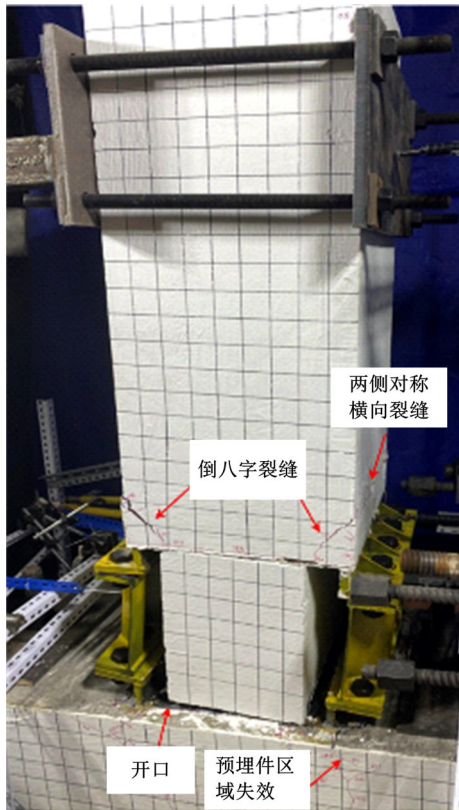


图 9 试件 1 局部损伤及变形

Fig. 9 Local damage and deformation of specimen 1

由于预埋件与波纹钢板的抗力比偏小,预埋件与混凝土之间产生粘结滑移破坏,预埋件无法有效传递波纹板的内力;随着加载偏移率的增长,预埋件与混凝土之间发生挤压、冲切等破坏现象,墩身出现了不同形式的贯穿裂缝,此时波纹钢板未进入屈服耗能,其性能无法充分发挥。

3.2 试件 2-1

试件 2-1 在墩顶位移加载至 4.88 mm(偏移率 0.4%)时,上部节段正面的预埋件两角处出现细微的斜向裂缝,形状如倒八字形;墩顶位移加载至 21.96 mm(偏移率 1.8%)时,承台正面沿预埋件与混凝土交界面产生的竖向细微裂缝已延伸至底部,且细微裂缝一直在沿承台两侧发展;墩顶位移加载至 24.4 mm(偏移率 2%)时,此时通过粘贴在开孔波纹钢板上的应变片数据得知,波纹钢板已经进入屈服阶段;上部节段侧面出现第二条横向裂缝,但并未横向贯通。后续以该位移进行

低周疲劳加载试验,在共计循环加载 70 圈后,试件承载力下降至峰值承载力的 80% 结束试验,由于预埋件与波纹钢板的抗力比较大,预埋件可有效传递波纹板的内力;预埋件与混凝土传力过程中新裂缝出现较小,最终损伤状态如图 10 所示。

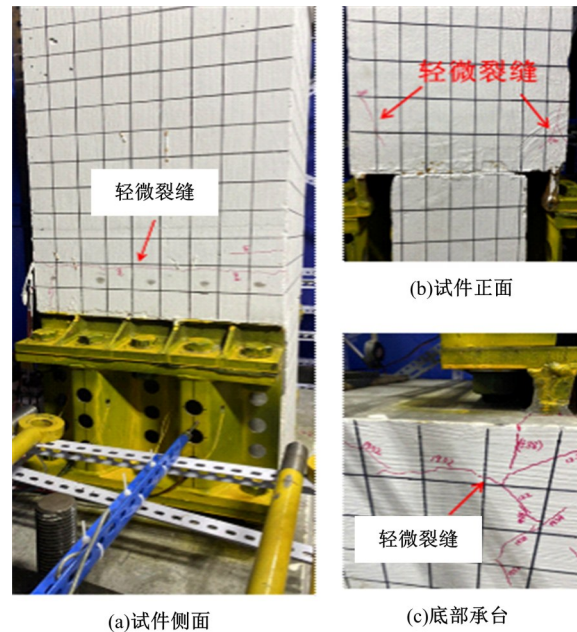


图 10 试件 2-1 局部损伤及变形

Fig. 10 Local damage and deformation of specimen 2-1

3.3 试件 2-2

试件 2-2 更换了新的开孔波纹钢板,并用混凝土修补剂对已产生的细微裂缝进行了局部修补,更换过程如图 11 所示。

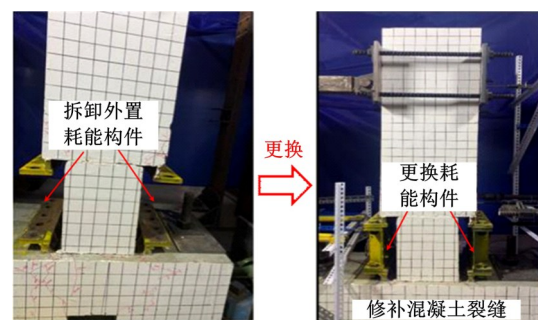


图 11 试件 2-2 的更换过程

Fig. 11 Replacement process of specimen 2-2

试件 2-2 在墩顶位移加载至 12.2 mm(偏移率 1%)时,裂缝发展沿着混凝土修补剂修补的裂缝处开裂,且裂缝均在已有细微裂缝之上出现。墩顶位移加载至 48.8 mm(偏移率 4%)时,开孔波纹钢板上排孔边缘处出现压屈变形,均是出现在试件加载的受压侧,且压屈变形现象随拉压加载左右交替出现,如图 12 所示。

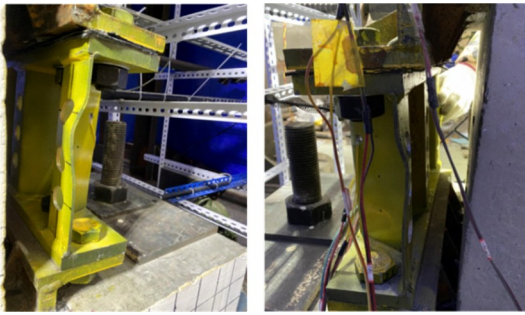


图12 试件2-2开孔波纹钢板压屈变形

Fig. 12 Compression and bending of external perforated corrugated steel plates of specimen 2-2

墩顶位移加载至 54.9 mm (偏移率 4.5%) 时,上部节段中间位置出现一条较长的斜裂缝,与此同时上部节段侧面中间位置也出现一条横向裂缝,两者有相互贯通的趋势。墩顶位移加载至 61mm (偏移率 5%) 时,试件上部节段出现第二条斜裂缝,并与前一加载等级下出现的裂缝相交,形成交叉 X 形裂缝;另外,侧面横向裂缝宽度较大。墩顶位移加载至 73.2 mm (偏移率 6%) 时,承载力下降已接近峰值承载力的 80%,裂缝发展及波纹板变形均无太大变化,整体变形如图 13 所示。

由于预埋件与波纹钢板的抗力比较大,预埋件可以有效传递波纹板的内力,波纹板首先进入屈服耗能状态,随后随着偏移率的增大,波纹钢板已充分屈服耗能,预埋件与混凝土之间发生挤压、

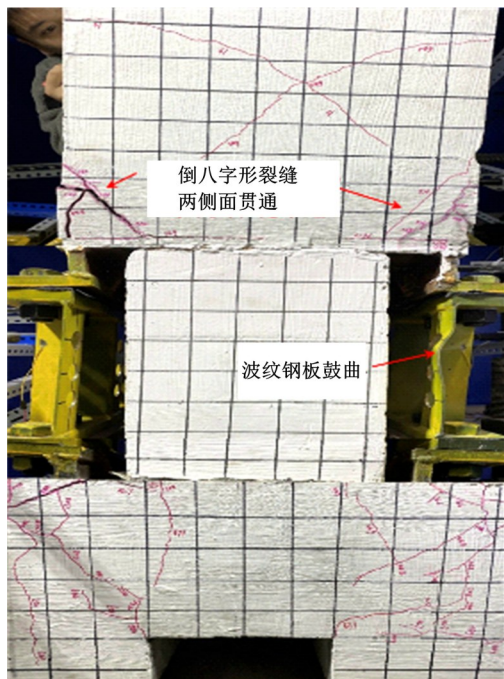


图13 试件2-2局部损伤及变形

Fig. 13 Local damage and deformation of specimen 2-2

冲切等破坏现象,墩身出现了不同形式的贯穿裂缝。

4 试验结果分析

4.1 滞回曲线

试件拟静力循环加载的水平荷载-侧移曲线如图 14 所示。试件 1 的滞回曲线随着加载等级的不断增大,曲线表现得越扁平,试件整体的耗能性能越差,波纹钢板在试验加载过程中无明显的压屈变形现象,并未发挥出波纹钢板耗能的性能;试件 2-1 在 2% 偏移率下的疲劳加载过程中,试件承载力下降缓慢,滞回曲线并无太大变化;试件 2-2 的滞回曲线随着加载等级的提高,曲线较试件 1 而言更饱满一些,试件整体的耗能能力得到较大提高,试验中开孔波纹钢板发生了显著的压屈变形现象,开孔波纹钢板实现了屈服耗能的目标。

4.2 可更换性

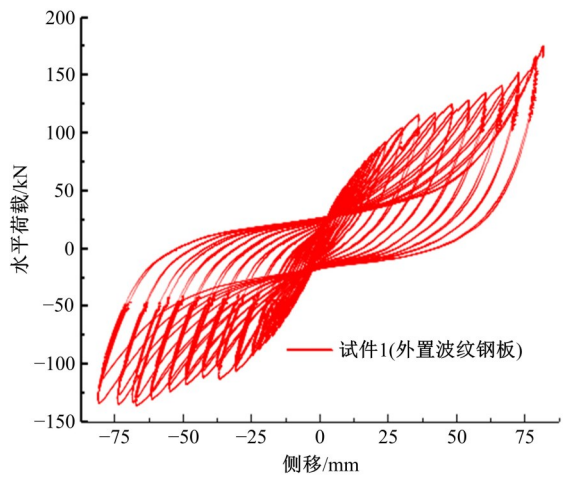
试件 2-1 设计目标位移下疲劳加载 70 圈,外置钢板进入屈服阶段,而预埋件部分处于弹性阶段,混凝土损伤较轻,满足外置耗能开孔波纹钢板的更换条件。更换外置耗能构件后,进行试件拟静力试验。对比图 14 中滞回曲线,试件 2-2 加载至侧移率 6.0%,耗能主要集中于波纹钢板处,滞回曲线稳定。

滞回曲线和试验破坏现象说明试件 2 的外置耗能部件在设计目标偏移率 2% 下具有可更换性,更换外置耗能元件后试件具有良好的整体抗震性能。

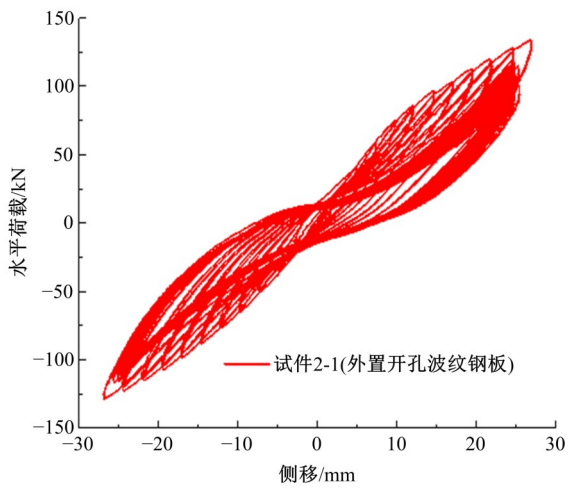
4.3 滞回环与能量比较

对比不同截面抗力比对试件滞回性能的影响,绘制试件 1 和 2-2 在侧移幅值分别为 1%、3%、5% 下的滞回环,如图 15 所示。每个试件选取每级加载偏移率下的第一圈滞回环,试件 2-2 单圈耗散能量比试件 1 分别高出 13.15%、39.44%、71.22%,可以看出随着侧移幅值的增大试件 2-2 的滞回环面积越来越大,且卸载刚度也均大于试件 1。

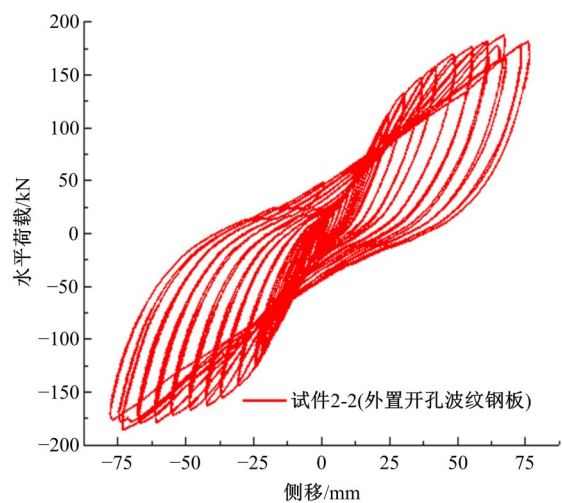
图 16 为试件 1 和试件 2-2 在不同侧移幅值下和能量耗散比较,从图中可以看出:在加载初期各试件的能量耗散基本一致,随着侧移幅值的增大,能量耗散均显著提高;当位移幅值为 5% 时,试件 1 能量耗散为 6.08 MN·mm,试件 2-2 的能量耗能为 10.41 MN·mm,比试件 1 高出 71.22%。与试



(a) 试件1拟静力加载



(b) 试件2-1低周疲劳加载

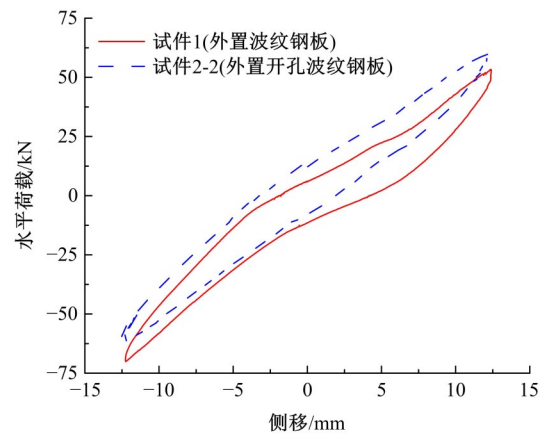


(c) 试件2-2拟静力加载

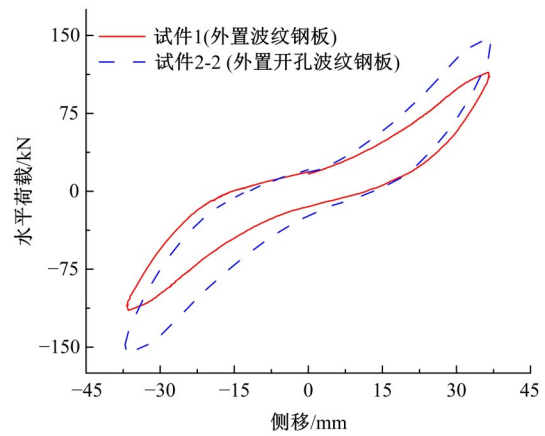
图 14 试件水平荷载-侧移曲线

Fig. 14 Load-displacement relationship of specimen

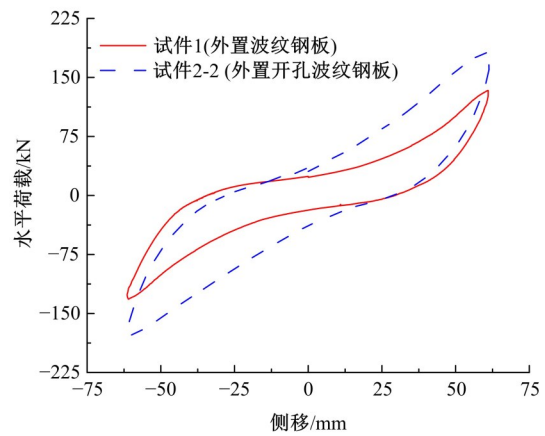
件 1 相比, 试件 2 因开孔波纹钢板与承台预埋件的抗侧刚度匹配更合理, 耗能主要集中在波纹钢



(a) 侧移幅值为1%



(b) 侧移幅值为3%



(c) 侧移幅值为5%

图 15 试件滞回环对比

Fig. 15 Comparison of hysteretic curves.

板上, 桥墩具有良好的整体抗震性能。

4.4 等效刚度

图 17 为试件 1 和试件 2-2 在拟静力加载过程中的等效刚度对比图。从图中可以看出试件 1 在 0.1% 侧移幅值下的初始刚度为 $9.6 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$, 在 6% 侧移幅值下的刚度为 $1.92 \text{ kN} \cdot$

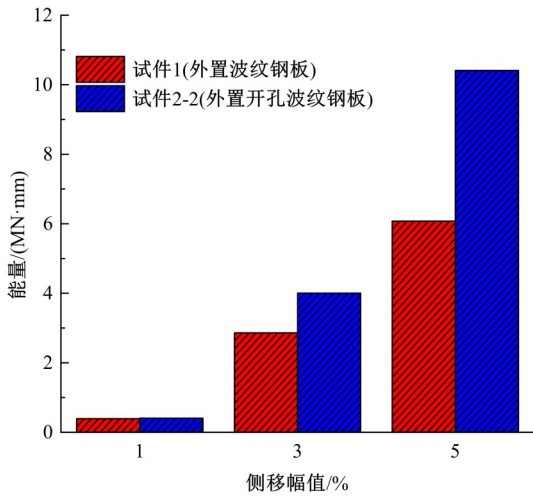


图 16 耗能对比

Fig. 16 Comparison of dissipated energy

mm⁻¹; 试件 2-2 在 0.1% 侧移幅值下的初始刚度为 8.46 kN·mm⁻¹, 在 6% 侧移幅值下的刚度为 2.39 kN·mm⁻¹。结构等效刚度均逐渐降低, 其中在侧移幅值 1% 前, 试件 1 的等效刚度大于试件 2-2, 随着侧移幅值的增大, 试件 2-2 的开孔波纹钢板开始发挥其耗能作用, 后续侧移幅值下试件 2-2 的等效刚度均大于试件 1。

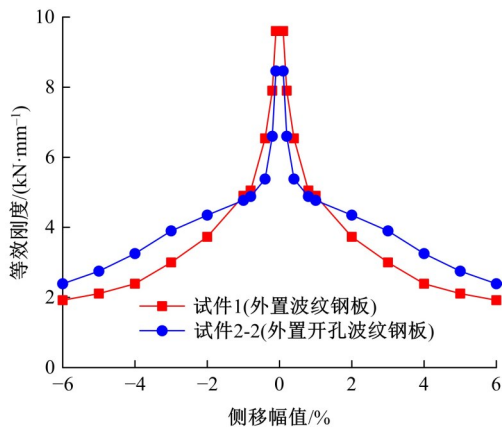


图 17 试件等效刚度

Fig. 17 Equivalent stiffness of specimens

4.5 耗能分析

试件 1 和试件 2-2 的累积能量耗散如图 18 所示。从图中可以看出试件 1 在侧移幅值 6% 时的累积能量耗散为 22 791.4 kN·mm, 试件 2-2 在侧移幅值 6% 时的累积能量耗散为 36 951.7 kN·mm。

从图 18 中还可以看出, 试件 1 和试件 2-2 在加载初期的累积耗能基本一致, 随着加载等级的不断提高, 在试件加载的侧移幅值达到 1% 时, 试件 2-2 的累积耗能开始大于试件 1; 试件加载的侧

移幅值达到 2% 时, 试件 2-2 的耗能性能较试件 1 增长了 22.8%; 在侧移幅值达到 4% 后, 试件 2-2 的累积能量耗散达到 12.94 kN·mm, 与试件 2-2 在 4% 侧移幅值下出现开孔波纹钢板压屈变形的试验现象一致; 在侧移幅值达到 6% 时, 试件 2-2 的累积能量耗散较试件 1 增长了 62.13%, 其耗能性能进一步提高。

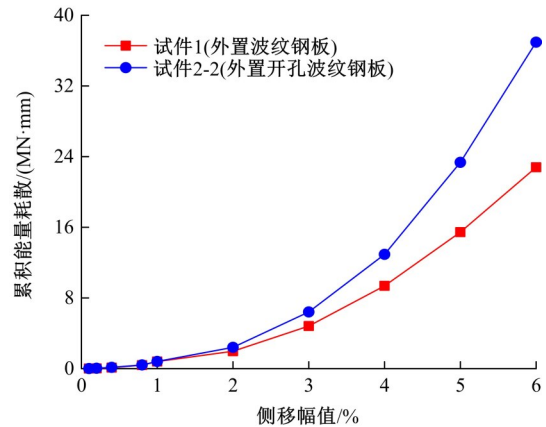


图 18 试件累积能量耗散

Fig. 18 Energy dissipation of specimens.

4.6 等效粘滞阻尼比

试件 1 和试件 2-2 的等效粘滞阻尼比如图 19 所示。

从图 19 中可以看出, 试件 1 的初始等效粘滞阻尼比为 6.91%, 6% 侧移幅值时的等效粘滞阻尼比为 11.3%, 试件平均等效粘滞阻尼比为 9.6%; 试件 2-2 的初始等效粘滞阻尼比为 14.1%, 最小等效粘滞阻尼比为 8.3%, 6% 侧移幅值时的等效粘滞阻尼比为 16.78%, 试件平均等效粘滞阻尼比为 12.46%。从数据对比可以发现试件 2-2 的等效粘滞阻尼比普遍大于试件 1, 说

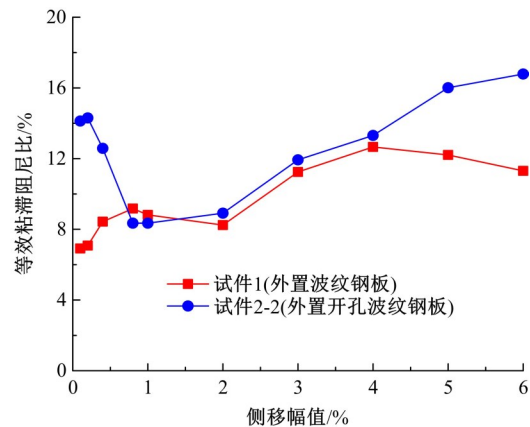


图 19 等效粘滞阻尼比随侧移幅值的变化

Fig. 19 Variation of equivalent viscous damping ratio with lateral displacement amplitude

明试件 2-2 的外置开孔波纹钢板的耗能性能高于波纹钢板,与试验现象的开孔波纹钢板压屈变形现象一致。

5 结 论

(1)外置波纹钢板与承台预埋件的刚度匹配度较差,外置波纹钢板桥墩破坏集中在预埋件部分,外置耗能装置性能并未充分发挥作用;而外置开孔波纹钢板桥墩,通过削弱截面,提高了截面抗力比,实现了外置耗能装置的耗能作用,使耗能主要集中在波纹钢板上,桥墩具有更好的整体抗震性能。

(2)刚度匹配的试件在设计目标位移下疲劳加载 70 圈,外置开孔波纹钢板进入屈服耗能,预埋件部分处于弹性阶段,变形较小;混凝土损伤较轻,证明试件的外置耗能装置在设计目标侧移率 2% 下具有可更换性。

(3)采用外置开孔波纹钢板的节段拼装桥墩具有更好的整体抗震性能。试验中在加载偏移率为 1%、3%、5% 下,外置开孔波纹钢板的试件单圈耗散能量比外置波纹钢板试件分别高出 13.15%、39.44%、71.22%,证明采用外置开孔波纹钢板的节段拼装桥墩具有更好的整体抗震性能。

(4)波纹钢板和外置波纹钢板与相应预埋件的合理匹配是影响其耗能性能是否得以实现的关键因素。后续针对预埋件与耗能装置的刚度匹配和预埋件设计形式等方面仍需进一步完善和改进。

参考文献:

- [1] Tazarv M, Saiidi M S. Low-damage precast columns for accelerated bridge construction in high seismic zones[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(3):No. 04015056.
- [2] 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 Yi-qiang, Zhu Sheng, Zhao Yang. Research progress on rapid construction bridges[J]. Chinese Journal of Highways, 2018, 31(12): 1-27.
- [3] Bao L S, Zhao J, Teng F, et al. Experimental study on the seismic performance of prefabricated frame piers[J]. Structures, 2023, 52: 651-665.
- [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 Jing-quan, Wang Zhen, Gao Yu-feng, et al. Research progress on seismic performance of prefabricated bridge pier systems: new materials, new concepts, and new applications[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 1-23.
- [5] 周颖, 吴浩, 顾安琪. 地震工程: 从抗震、减隔震到可恢复性[J]. 工程力学, 2019, 36(6): 1-12.
Zhou Ying, Wu Hao, Gu An-qi. Earthquake engineering: from earthquake resistance, isolation reduction to resilience[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 1-12.
- [6] Mander J B, Cheng C T. Seismic resistance of bridge piers based on damage avoidance design[R]. Buffalo: US National Center for Earthquake Engineering Research, 1997.
- [7] Hewes J T, Priestley M J N. Seismic design and performance of precast concrete segmental bridge columns[R]. San Diego: University of California, 2002.
- [8] Chou C C, Chen Y C. Cyclic tests of post-tensioned precast CFT segmental bridge columns with unbonded strands[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(2): 159-175.
- [9] 王文伟, 周畅, 薛彦杰, 等. 外置耗能钢板预制拼装桥墩抗震性能研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2020, 47(9): 57-68.
Wang Wen-wei, Zhou Chang, Xue Yan-jie, et al. Study on seismic performance of prefabricated assembled piers with external energy dissipation steel plates [J]. Journal of Hunan University(Natural Science Edition), 2020, 47(9): 57-68.
- [10] Ou Y C, Tsai M S, Chang K C, et al. Cyclic behavior of precast segmental concrete bridge columns with high performance or conventional steel reinforcing bars as energy dissipation bars[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 39(11): 1181-1198.
- [11] Ou Y C, Wang P H, Tsai M S, et al. Large-Scale experimental study of precast segmental unbonded posttensioned concrete bridge columns for seismic regions[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(3): 255-264.
- [12] Ou Y C, Pratiwi A Y, Song J. Pseudo dynamic testing and inelastic displacement ratios of self-centering precast concrete segmental bridge columns[J]. Journal

- of Structural Engineering, 2018, 144(9): No. 04018158.
- [13] Eigawady M A, Sha' Lan A. Seismic behavior of self-centering precast segmental bridge bents[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(3): 328-339.
- [14] 孙治国, 谷明洋, 司炳君, 等. 外置角钢摇摆-自复位双柱墩抗震性能分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 40-49.
Sun Zhi-guo, Gu Ming-yang, Si Bing-jun, et al. Seismic performance analysis of rocking-self-centering double-column piers with external angle steel[J]. China Journal of Highways, 2017, 30(12): 40-49.
- [15] Marriott D, Pampanin S, Palermo A. Biaxial testing of unbonded post-tensioned rocking bridge piers with external replaceable dissipaters[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(15): 1723-1741.
- [16] Marriott D, Pampanin S, Palermo A. Quasi-static and pseudo-dynamic testing of unbonded post-tensioned rocking bridge piers with external replaceable dissipaters[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2009, 38(3): 331-354.
- [17] Guerrini G, Restrepo J, Massari M, et al. Self-centering precast concrete dual-shell steel columns[C]// Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012.
- [18] Guerrini G, Restrepo J, Schoettler M. Self-centering, low-damage, precast post-tensioned columns for accelerated bridge construction in seismic regions [C]// Proc of 16th World Conf on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 2017.
- [19] 贾俊峰, 魏博, 欧进萍, 等. 外置可更换耗能器的预制拼装自复位桥墩抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 154-162.
Jia Jun-feng, Wei Bo, Ou Jin-ping, et al. Experimental study on seismic performance of prefabricated assembled self-centering piers with external replaceable dampers[J]. Vibration and Impact, 2021, 40(5): 154-162.
- [20] 赵建锋, 刘雪飞, 孟庆一, 等. 外置可更换耗能装置的节段拼装CFST桥墩抗震性能分析[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(5): 1113-1121, 1145.
Zhao Jian-feng, Liu Xue-fei, Meng Qing-yi, et al. Seismic performance analysis of segmental CFST piers with external replaceable energy dissipation devices[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(5): 1113-1121, 1145.