

# 考虑承插深度变化的预制拼装桥墩 抗震性能试验研究

宋承哲<sup>1,2</sup>, 思晓龙<sup>1</sup>, 张 潇<sup>2</sup>, 王苓力<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 教育部城市安全与灾害工程重点实验室, 北京 100124; 2. 辽宁省交通规划设计院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要:**为研究承插深度对承插结构抗震性能的影响,设计制作了现浇桥墩以及考虑承插深度变化的装配桥墩,其中承插桥墩的承插深度分别为 $1.0d$  ( $d$ 为方墩边长)、 $0.8d$ 以及 $0.6d$ 。通过拟静力试验研究分析桥墩的破坏现象、滞回性能以及耗能能力等,讨论承插深度对桥墩的影响。试验结果表明:4组试件的峰值承载力相近; $1.0d$ 承插桥墩具有与现浇桥墩类似的破坏现象与滞回曲线,抗震性能等同现浇桥墩; $0.8d$ 承插桥墩、 $0.6d$ 承插桥墩由于承台的损伤,延性弱于现浇桥墩。通过对比破坏现象,分析了现有配筋情况下,承台侧壁抗剪承载力与墩柱极限抗剪承载力之间的相对关系。当墩柱和承台配筋率不变的情况下,墩柱承插深度越小,侧壁抗剪承载能力越低,承台插槽的侧壁越容易发生因抗剪承载力降低而导致的损伤。因此,设计中承插深度的选择需要考虑墩柱与承台插槽侧壁承载能力相对大小关系,以避免损伤发生于承台位置。

**关键词:**预制桥墩;承插连接;拟静力试验;承插深度;抗震性能

中图分类号:U443.22

文献标识码:A

## Experimental investigations on the seismic performance of prefabricated assembled piers considering the variation of socket depth

SONG Chengzhe<sup>1,2</sup>, SI Xiaolong<sup>1</sup>, ZHANG Xiao<sup>2</sup>, WANG Lingli<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Company, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** To investigate the impact of socket depth on the seismic performance of socket structures, a group of a cast-in-place pier and precast piers considering the variation of socket depth were designed and fabricated, of which the socket depths of the socket piers were  $1.0d$  (where  $d$  represents the side length of the square pier),  $0.8d$ , and  $0.6d$ , respectively. Pseudo-static tests were conducted to analyze the damage patterns, hysteresis performance, and energy dissipation capacity of the piers, allowing for an examination of the influence of socket depth on their behavior. The test results demonstrate that the bearing capacity of the four groups of specimens is similar. The socketed piers with a socket depth of  $1.0d$  exhibit damage patterns and hysteresis curves that are comparable to those of cast-in-place piers, indicating equivalent seismic performance. However, the ductility of the socket piers with embedment depths of  $0.8d$  and  $0.6d$  is weaker than that of the cast-in-place piers due to damage to the footing. By comparing the damage phenomenon, the relative relationship between the shear bearing capacity of the footing sidewall and the ultimate bearing capacity of the column is analyzed under the existing reinforcement ratio. As the socket depth of the pier decreases, the shear capacity of the groove sidewall decreases. This increases the probability of damage to the groove sidewall due to the reduced shear bearing capacity. Therefore, it is crucial to

收稿日期:2023-07-08; 修回日期:2023-11-28

基金项目:辽宁省交通科技项目(201915)

作者简介:宋承哲(1990—),男,高级工程师,硕士,主要从事桥梁工程研究。E-mail:songzhe0323@163.com

consider the relative relationship of the bearing capacity between the footing and the column when selecting the socket depth in the design to prevent damage in the footing position.

**Key words:** precast piers; socket connection; pseudo static test; socket depth; seismic performance

## 0 引言

近年来,随着桥梁施工技术的提高,施工方法的可选择性增强,传统现浇方法的缺点被不断放大,如:施工周期长,混凝土养护条件不易保证,能耗高等<sup>[1-2]</sup>。为了解决上述传统施工方法存在的问题,桥梁预制拼装技术被逐渐应用于各地区桥梁建设中。装配式桥梁通过工厂预制、现场装配进行施工,可大大提高机械化操作水平,在提高质量的同时加快施工进度,减小对既有交通的干扰,且有利于环境保护,减少现场污染、实现低碳化建设的有效手段<sup>[3]</sup>。装配式结构连接位置的可靠性和工作性能是决定装配式结构抗震性能的主要因素,在地震作用下预制装配结构的破坏主要来自于节点位置处的损伤累积<sup>[4-9]</sup>。目前,预制装配桥墩的连接常用构造形式一般有以下几种:灌浆套筒连接<sup>[10-12]</sup>、灌浆金属波纹管连接<sup>[13-15]</sup>、承插式连接<sup>[16-17]</sup>、预应力连接等<sup>[18-20]</sup>,而每一种连接方式均有其自身优势以及适用的施工工况。

承插连接作为预制装配连接的有效手段之一,是一种具有较大施工容差的技术方法<sup>[21]</sup>,适用于地形较为复杂的抗震区桥梁施工,因此,国内外不少学者开始对承插结构及其主要影响因素进行了研究。1996年,OSANAI等<sup>[22]</sup>对承插式连接进行了拟静力分析,并推导了承插式结构节点区域的受力公式,得到承插深度大于 $1.5d$ (其中 $d$ 为墩柱边长或直径,后续无特殊说明 $d$ 均指桥墩边长或直径)时可以不设置剪力键进行连接。CANHA等<sup>[23]</sup>同样对承插式连接有无剪力键的受力计算进行了分析,并得到了相关的计算公式。CHENG等<sup>[24]</sup>研究了侧壁剪切机制对于承插墩柱的影响,试验结果表明侧壁的剪力显著提高了结构抗力,有利于传递更大的竖向荷载。

影响承插结构抗震性能的因素众多,而承插段构造形式与承插深度是主要的影响因素之一。ZHANG等<sup>[25]</sup>研究了带有齿键的 $1.0d$ 承插桥墩的抗震性能,认为齿键提供了良好的锚固效果,承插试件具有与现浇结构类似的抗震性能指标。LIU等<sup>[26]</sup>提出一种新的波纹钢管承插连接构造,并通过不同试件分析了承插深度、剪力键等对新型连接构造的影响,并得到该新型波纹钢管承插结构耗能及承载力均优于现浇结构的结论。张智然等<sup>[27]</sup>研究了 $1.0d$ 承插矩形桥墩与现浇结构的抗震性能,经过拟静力试验分析得到 $1.0d$ 承插深度通过具体设计可以达到与现浇等同或接近的抗震性能。齐新等<sup>[28]</sup>对比了 $0.8d$ 和 $1.0d$ 承插试件承载力、滞回性能等关键指标,发现 $0.8d$ 承插深度桥墩可以提供类似于 $1.0d$ 承插试件的约束效果。

徐艳等<sup>[29]</sup>研究了空心管墩不同承插深度的承载力,并建立有限元模型分析灌浆料对结构的影响。晋智斌等<sup>[30]</sup>研究了浅承插( $0.7d$ )空心墩后灌浆混凝土高度对桥墩抗震性能的影响,试验结果说明后灌浆高度 $350\text{ mm}$ 试件的延性、耗能等均弱于高度为 $800\text{ mm}$ 的试件。韩艳等<sup>[31]</sup>研究了承插段不做处理的承插桥墩抗震性能,根据试验结果,证明 $1.0d$ 承插深度时墩柱的承载力与破坏模式均与现浇结构相同。ZHOU等<sup>[32]</sup>研究了带剪力键构造的空心管段的抗震性能,提出 $0.325d$ (墩柱直径)的填芯混凝土管墩的抗震性能与现浇结构类似。XU等<sup>[33]</sup>推导了承插结构受力模式,用简化公式求解了理论最小承插深度为 $0.51d$ ,并用试验验证了 $0.5d$ 承插空心墩的抗震性能。

通过上述对于桥墩承插深度影响的研究可知,不同桥墩结构类型、不同构造形式的桥墩有效承插深度可能会不同。即便是同一类型桥墩在不同墩柱配筋率等因素的影响下也可能表现出差异。而合理的承插深度,既可以避免承插深度太深,造成原材料的浪费,导致造价提高,又避免由于承插深度过低引起的承载力、延性不足的情况出现。因此保持现有配筋率不变的基础上,仍有必要对具有承插深度变化的桥墩进行细致研究。同时,相比于承插结构的广泛应用需求而言,现有研究针对具有承插深度变化的桥墩试验研究仍然较少,且较多集中于空心管墩的研究,对实体桥墩的分析同样较少。

基于此,本文提出研究变量为承插深度的实体式预制桥墩,研究不同承插深度因素下桥墩的抗震性能,并从破坏模式、滞回性能和耗能等方面与现浇结构进行比较,描述其差异。最后通过考虑承插深度变化的拟静力试验,为相关承插结构的应用与设计提供有效参考。

# 1 拟静力试验设计及试件加工

## 1.1 试件模型设计

本次试验设计了4组试件,分别为现浇桥墩试件、承插深度 $1.0d$ 试件,承插深度 $0.8d$ 试件以及承插深度 $0.6d$ 试件,其中 $d$ 为墩柱直径。后续为说明方便,对试件依次进行编号,将现浇结构到承插深度 $0.6d$ 试件名称,分别用S-1、S-2、S-3以及S-4试件编号代替。试件的详细构造及配筋情况如图1和图2所示。

如图1所示,现浇结构整体高度为3.35 m,其中承台顶面墩柱高度为2.55 m,墩柱为方形截面,边长为0.50 m,承台高度为0.80 m,承台加载方向边长为1.50 m,非加载方向边长为1.30 m。墩柱内主筋直径为20 mm,箍筋采用直径为10 mm的HRB400级钢筋,现浇节点的纵筋率为2.0%,箍筋的体积率为0.67%。现浇结构纵筋伸入承台内部长度为0.687 m,满足钢筋的锚固长度要求。墩柱内采用四肢箍的方式保证其核心混凝土的强度,承台内部使用拉勾形式钢筋作为连接顶、底部的承台主筋的构造。其中,承台内部主筋直径为16 mm,构造钢筋和箍筋直径均为8 mm。

承插结构的尺寸与现浇结构类似,墩柱配筋率相同,如图2所示。与现浇试件的区别在于通过预制墩柱与承台,进行承插装配式连接。墩柱底部布设网格状钢筋防止冲切破坏,承台预留边长为56 cm的承插槽,在承插槽位置布置L型钢筋,为承插槽提供抗剪需求,墩柱与承台之间的空隙灌注超高性能混凝土(UHPC)进行连接。

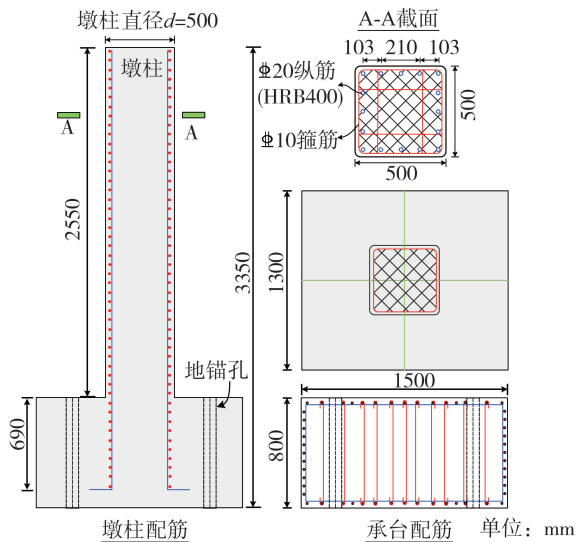


图1 现浇试件尺寸及配筋

Fig. 1 Dimension and reinforcement of cast-in-place specimens

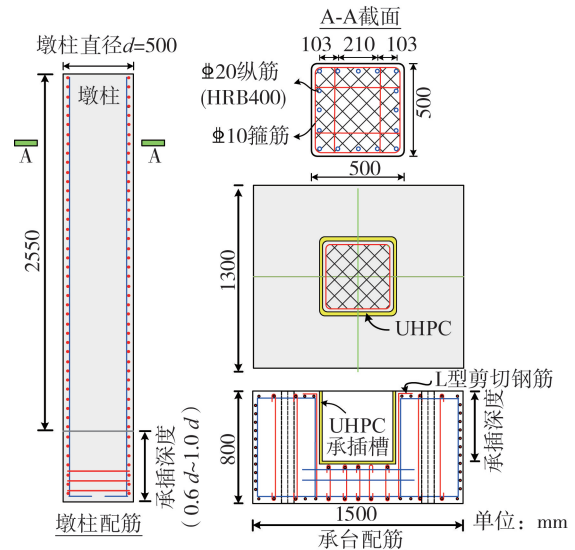


图2 承插试件尺寸及配筋

Fig. 2 Dimension and reinforcement of socket specimens

如图3所示,承台采用HRB400级钢筋进行绑扎,其中直径为16 mm主筋主要有2种形式,分别是N1和N2,由于承插槽的存在,因此将N2设计为“凹”型构造。

直径为8 mm的箍筋同样有2种类型,一种是方形环箍,用于将主筋进行固定,分布于最外侧,为8 mm,分布间距为6 cm;另一种箍筋为拉结箍筋,便于将顶、底主筋进行连接。在承插槽四周设置直径为12 mm的L型剪切钢筋,每侧布置7根,布置间距为9 cm。

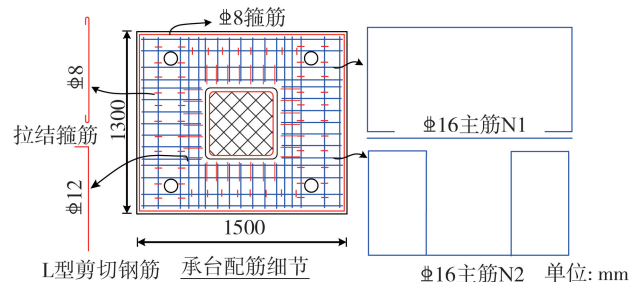


图3 承台配筋细节

Fig. 3 Reinforcement details of footing

承插试件的加工与制作过程如图4所示。制作过程:①先进行墩柱、承台的钢筋绑扎,并在特定位置布设应变片;②支模、加固墩柱及承台并进行混凝土浇筑;③将养护后的墩柱、承台进行拼装,调整墩柱位置后,在承插缝隙中灌注UHPC,保证墩柱与承台的连接;④将试件运输至试验场地,并对试件进行锚固。



图 4 承插试件制作流程

Fig. 4 Fabrication process of socket specimens

1.2 材性试验

通过材性试验分别对试验过程中使用材料进行测试,测试其强度大小,如图 5 所示。根据 6 组立方体试件得到混凝土试件的抗压强度为 50 MPa,根据 3 组边长为 100 mm 的立方体试块测得 UHPC 的平均抗压强度为 121 MPa,如图 6 所示。3 根长度为 500 mm 的钢筋进行了拉伸试验,直径为 20 mm 的纵筋,其平均屈服强度为 409 MPa,极限强度为 576 MPa,材料的详细参数如表 1 所示。



图 5 混凝土抗压强度测试

Fig. 5 Compressive strength test of concrete

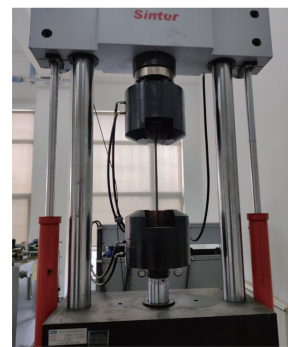


图 6 钢筋抗拉强度测试

Fig. 6 Tensile test of reinforcements

表 1 材料特性

Table 1 Material properties

材料类型	尺寸/mm	强度/MPa	材料类型	尺寸/mm	强度/MPa	材料类型	尺寸/mm	强度/MPa
混凝土	150×150×150	50	UHPC	100×100×100	121	钢筋	20	409/576

1.3 加载制度

试验加载布置如图 7 所示,整个试件通过地锚杆固定于地梁上,水平及竖向作动器均采用 200 t 的液压伺服作动器,可施加最大水平位移为 300 mm。加载头位置布设拉线位移计监测水平位移,墩柱底部设置百分表监测墩柱变形,同时在承台侧面布置位移计便于观察试验中承台的位移。试验过程中,在加载柱头顶部按照轴压比为 0.06,施加 400 kN 的竖向力表征桥梁上部荷载,水平加载方向按照先力后位移控制加载,力阶段循环加载 1 次,位移荷载每级循环加载 2 次,直至试件承载力下降到峰值承载力的 85% 以下,认为达到破坏条件后停止加载,加载制度如图 8 所示。

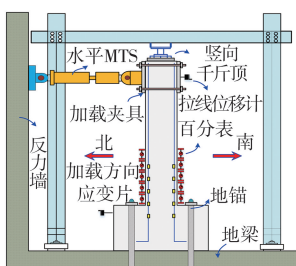


图 7 试验加载布置图

Fig. 7 Test loading setups

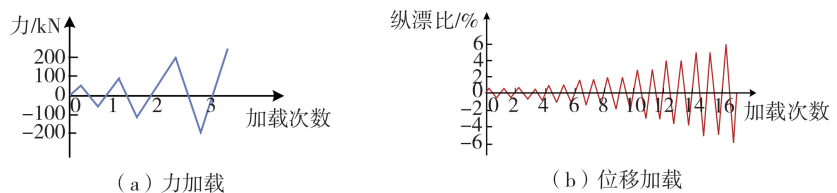


图 8 加载制度

Fig. 8 Loading system

## 2 破坏现象分析

通过拟静力试验,分别对4组试件进行试验研究。对试件的裂缝开展及分布情况进行描述,根据试件破坏形式分析破坏的原因,并对4组试件进行比较。

### 2.1 试件 S-1

试件 S-1 在力阶段加载至 150 kN 时,墩柱底部出现发丝般微裂缝,试件接近进入塑性阶段,因此转为位移加载。纵漂比(墩顶位移与承台面至加载点距离的比值)从 0.5% 加载至 3% 的过程中,裂缝从受拉侧不断的扩展延伸至墩柱的正面及背面,且裂缝宽度不断增加,墩身最大裂缝宽度达 1.4 mm,墩柱底部有少量混凝土剥落现象。裂缝主要分布于墩柱以上 1.0 m 范围内,其中北侧裂缝用蓝色表示,南侧裂缝用红色表示,具体裂缝分布情况如图 9(a) 所示。3.0% 纵漂比后,继续进行加载,裂缝开展速度减缓,基本无新增裂缝产生,由于墩柱在往复荷载作用下钢筋不断屈曲变形,导致混凝土破坏加剧,不断出现大块混凝土剥落现象。试件破坏时,混凝土块剥落范围约为 40 cm 左右,如图 9(b) 所示,墩底钢筋屈曲变形严重,伴随着混凝土大块剥落,属于典型的墩底塑性铰破坏。

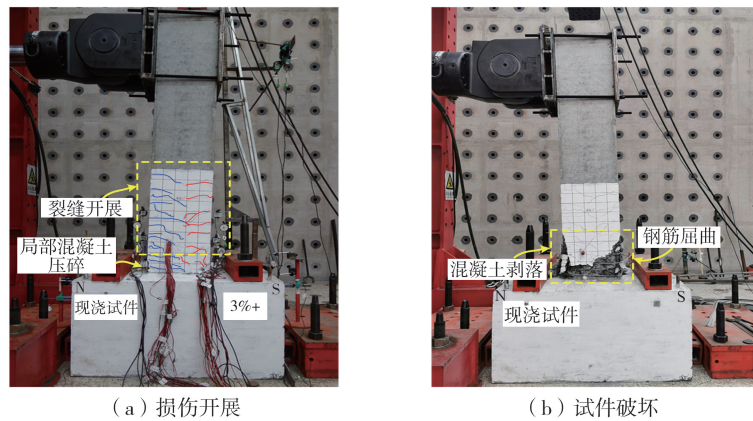


图9 试件 S-1 破坏过程

Fig.9 Failure process of specimen S-1

### 2.2 试件 S-2

承插试件 S-2 加载试验图,如图 10 所示,其损伤分布与破坏情况与试件 S-1 相似,具体加载过程如下。

试件 S-2 在力阶段加载至 150 kN 时,墩柱底部 30 cm 左右高度出现微裂缝,转为位移加载后,裂缝开展迅速,且墩柱局部存在混凝土压碎剥落现象,具体裂缝分布及混凝土剥落情况如图 10(a) 所示。4.0% 纵漂比后,钢筋屈曲变形,墩柱破坏加剧,出现大块混凝土剥落现象。试件破坏时,混凝土块剥落范围约为 30 cm 左右,如图 10(b) 所示,墩底钢筋外露,且屈曲变形严重,属于典型的墩底塑性铰破坏。

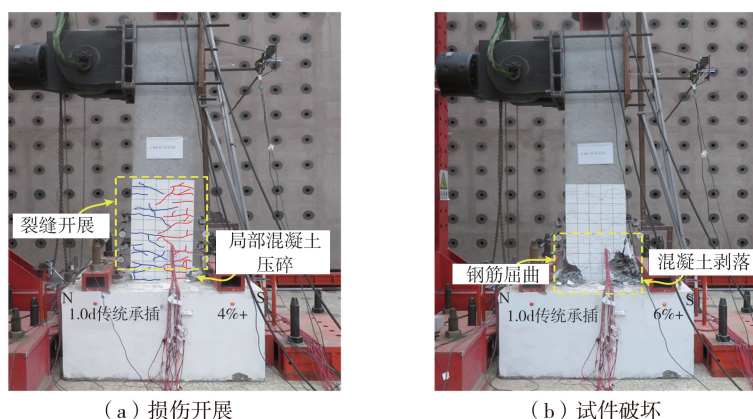


图10 试件 S-2 破坏过程

Fig.10 Failure process of specimen S-2

### 2.3 试件 S-3

试件 S-3 在力阶段加载至 150 kN 时,墩柱底部出现可见裂缝,转为位移加载后,墩身裂缝增加迅速,南北侧裂缝分布较为均匀,其中北侧裂缝用蓝色表示,南侧裂缝用红色表示。而当纵漂比达到 3% 时,承台出现微裂缝并进行延伸,承台裂缝宽度达 0.2 mm,具体裂缝分布情况如图 11(a) 所示。3.0% 纵漂比后,墩身裂缝开展速度减缓,由于钢筋不断屈曲变形,导致混凝土破坏加剧,南北侧墩柱底部均出现混凝土剥落现象,南侧剥落程度较北侧高,剥落范围约 25 cm 左右。如图 11(b) 所示,加载至破坏阶段,承台出现翘起裂缝,墩柱墩底出现塑性铰破坏,同时也伴随着承台的部分损伤。具体破坏情况如图 11(c) 所示,承台翘起破坏破坏范围较大并延伸至承台正面,呈现扇形分布。北侧承台表面混凝土翘起高度为 8 mm,南侧承台表面混凝土翘起高度为 14 mm。

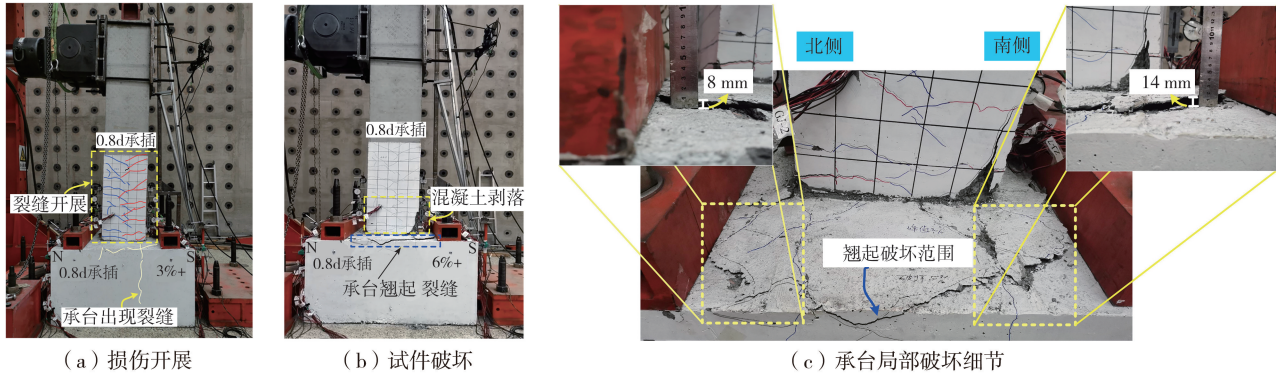


图 11 试件 S-3 破坏过程

Fig. 11 Failure process of specimen S-3

### 2.4 试件 S-4

试件 S-4 同样在力阶段加载至 150 kN 时,南北两侧墩柱底部均出现微裂缝,分布高度约为 20、40 cm。转为位移加载后,纵漂比从 0.5% 加载至 2.5% 的过程中,裂缝数量迅速增加,且最大裂缝宽度达 0.8 mm,墩柱底部有少量混凝土剥落现象。裂缝主要分布于墩柱以上 1.0 m 范围内,但从纵漂比 2.0% 开始,承台开始出现微裂缝,并不断延伸至承台正面。具体裂缝分布情况如图 12(a) 所示。如图 12(b) 所示,2.5% 纵漂比后,继续进行位移加载,裂缝扩展延伸速度变缓,钢筋屈曲变形现象不明显,仅墩柱底部出现少量混凝土剥落破坏。而承台破坏不断增加,承台面出现翘起裂缝,随着往复荷载作用,墩柱在承插位置出现转动,属于承台损伤。具体破坏现象如图 12(c) 所示,墩柱损伤较 S-3 试件更小,承台翘起破坏范围集中于承台顶面,承台正面有裂缝延伸。北侧承台表面混凝土翘起高度为 13 mm,南侧承台表面混凝土翘起高度为 9 mm。

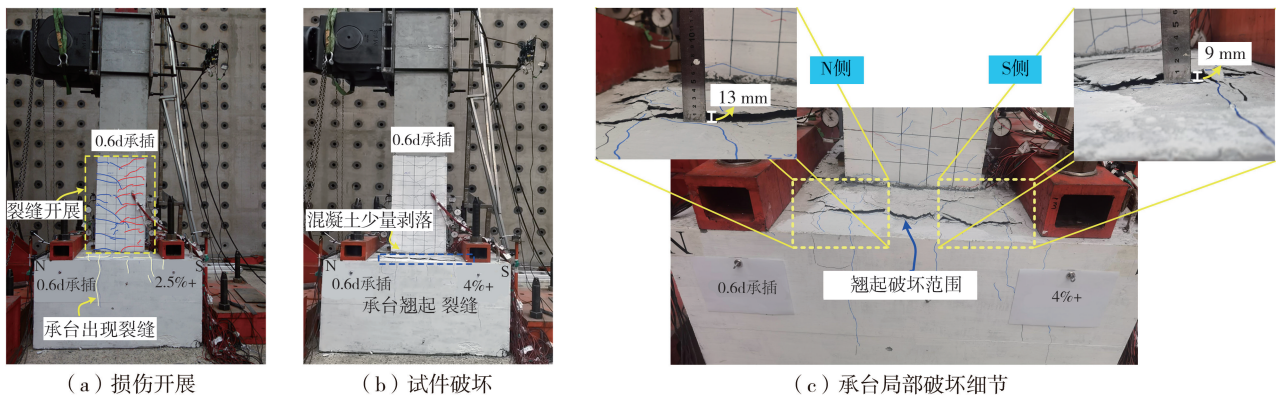


图 12 试件 S-4 破坏过程

Fig. 12 Failure process of specimen S-4

综上,由拟静力试验破坏现象可知,试件 S-1 与试件 S-2 破坏现象类似,均以墩底出现塑性铰的弯曲破坏现象为主,纵筋发挥充分作用,屈曲变形严重,导致混凝土产生较大损伤,破坏过程发展充分,属于延性破坏,试件 S-3 墩柱底部同样出现钢筋屈曲变形以及混凝土剥落破坏,但承台同样出现翘起裂缝,破坏速度较试件 S-1 和试件 S-2 略快,破坏时以墩柱破坏为主,伴随着承台产生部分破坏。试件 S-4 的墩柱混凝土剥落不明显,承台出现翘起破坏,破坏速度较前 3 组试件更快。

根据试验结果,分析出现此现象的主要原因如图13所示,不考虑墩柱侧壁承插段构造措施,当承插深度为 $1.0d$ 时,锚固深度足够,承插槽侧壁提供的约束效果较好,摩擦力、灌浆料等产生的黏结力等共同产生的竖向作用( $f_1$ 、 $f_2$ )更大,在相同的水平推力( $V$ )的作用下,整个承插槽呈现稳定的受力体系。承插深度为 $1.0d$ 时,侧壁合力 $F_1$ 、 $F_2$ 作用范围大,相应的承台侧壁局部应力就会减小,偏于安全。由试验现象判断,承插深度为 $0.8d$ 时,可能处于承插深度的临界位置,破坏位置取决于墩柱截面的承载能力与承台侧壁承载能力的相对大小关系,当墩柱承载力较小时,损伤发生于墩柱之上,并产生部分混凝土剥落,而当墩柱承载力较大时,承台侧壁受到的应力较大,承插槽侧壁提供的承载能力不足导致产生承台的损伤。当承插深度为 $0.6d$ 时,摩擦力、灌浆料等产生的黏结力等共同产生的竖向作用( $f_1$ 、 $f_2$ )大幅度减小,墩柱侧壁合力作用范围减小,承台侧壁的局部应力增加,斜截面抗剪承载能力降低,增大了承台失效的可能性。

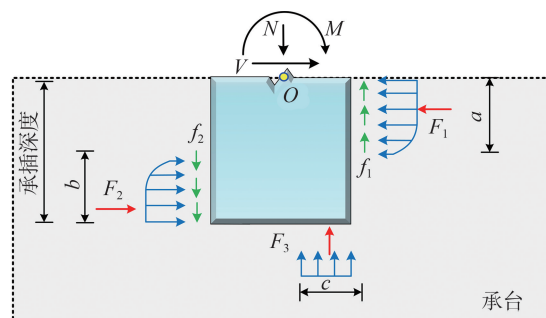


图13 承插连接的受力简图

Fig. 13 Force diagram of socket connection

为进一步阐明承台配筋与破坏类型的关系,特对承台侧壁斜截面抗剪承载力进行分析。由图13中脱离体所示,墩柱的极限破坏弯矩 $M$ 可以由墩柱嵌入段受到的水平向荷载 $F_1$ 和 $F_2$ ,竖向荷载 $f_1$ 、 $f_2$ 和 $F_3$ 根据受力平衡方程求解,对应的关系式已经有很多学者进行研究<sup>[23,34]</sup>,而 $F_2$ 和 $f_2$ 与 $F_{22}$ 和 $f_{22}$ 是作用力与反作用力的关系,因此墩柱极限弯矩可以由含 $F_{22}$ 和 $f_{22}$ 的计算式表示。当承台侧壁受到水平力 $F_{22}$ 和竖向力 $f_{22}$ 的作用时,易产生图14(a)所示的剪切面破坏,剪切面穿过拉结箍筋、L型剪切钢筋和主筋 $N_1$ 与 $N_2$ 的作用区域,其抗剪承载力可根据14(b)图示计算得到。斜截面极限抗剪承载力 $V_u$ 可以由式(1)计算:

$$V_u = (V_c + V_g + V_N + V_s) / \cos \theta \quad (1)$$

式中: $V_c$ 和 $V_g$ 分别为混凝土和拉结箍筋的抗剪承载力; $V_N$ 为主筋的抗剪承载力; $V_s$ 为L型剪切钢筋的抗剪承载力。而 $V_u$ 与水平力 $F_{22}$ 和竖向力 $f_{22}$ 存在关系如式(2)所示:

$$V_u = F_{22} \times \sin \theta + f_{22} \times \cos \theta \quad (2)$$

式中: $\theta$ 为斜截面的发生的角度,因此可由斜截面极限抗剪承载力同样可以计算得到墩底弯矩 $M_v$ ,根据 $M_v$ 与墩底极限弯矩 $M$ 进行比较,如式(3)所示:

$$\begin{aligned} M_v < M, & \text{承台破坏} \\ M_v > M, & \text{墩柱破坏} \end{aligned} \quad (3)$$

$M$ 大于 $M_v$ 则会先发生侧壁剪切破坏,优先达到斜截面极限抗剪承载力。而当 $M$ 小于 $M_v$ 则会先发生墩底破坏,侧壁承载力更大,不易破坏。而墩底极限弯矩 $M$ 的大小取决于其配筋率, $M_v$ 的大小也与其斜截面内箍筋、L型连接钢筋以及主筋的配筋率有关。

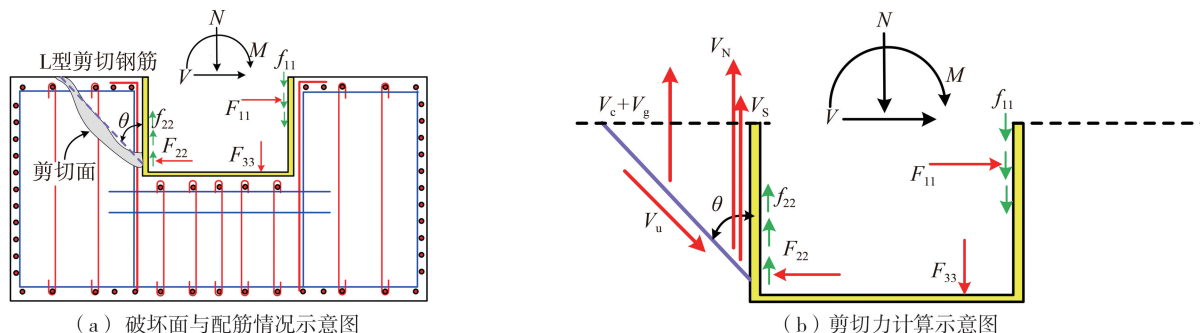


图14 承台破坏分析

Fig. 14 Damage analysis of footing

更重要的是,当承插深度减小,斜截面内提供抗剪承载力的混凝土面积和拉结箍筋数量会减小,因此 $V_c$ 和 $V_g$ 均会减小,而 $V_N$ 与 $V_s$ 也会由于剪切破坏面的上移导致锚固长度的不足,造成抗剪承载能力的降低。因此承插深度越浅,越容易发生侧壁的剪切破坏。从试验结果来看, $1.0d$ 承插深度时,墩底极限弯矩 $M$ 小于 $M_v$ ,从而破坏出现于墩柱底部位置; $0.8d$ 承插深度时,墩柱发生少量破坏,承台发生剪切破坏,表明其 $M_v$ 与

墩底极限弯矩  $M_u$  接近,产生混合破坏;而当承插深度降低至  $0.6d$  时,  $M_u$  降低,小于墩底弯矩  $M$ ,因此破坏主要发生于承台位置。当使用侧壁无剪力键构造的承插桥墩时,承插深度的选择与墩柱自身承载能力(配筋率)、承台插槽侧壁承载能力等多个因素有关。墩柱的承载力与承台插槽侧壁承载力的相对大小关系是墩柱破坏类型的决定因素之一,当墩柱截面承载能力远小于承台插槽侧壁的承载力,承台侧壁具有足够的承载能力可以保证其损坏发生于墩柱位置。当然一味地增加承台配筋以提高承台的承载能力会造成原材料浪费,成本提高等问题,因此在设计时需根据实际墩柱配筋、承台配筋等考虑安全系数。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 滞回性能

试件 S-1 的滞回曲线形状饱满,滞回环面积较大,如图 15(a) 所示。曲线初始阶段表现出弹性的特征,屈服后试件逐渐达到峰值承载力,整个破坏过程中,曲线下降缓慢,呈现出良好的延性性能。同时,曲线表现出一定程度的捏缩现象,主要原因是试件 S-1 的纵筋屈曲变形严重,墩底钢筋与混凝土之间产生了黏结滑移。如图 15(b) 所示,试件 S-2 的滞回曲线与试件 S-1 类似形状饱满,滞回环面积较大。试件逐渐达到峰值承载力后,随着位移的继续加载,承载力变化并不明显,当加载至 100 mm 左右时,曲线开始出现下降。同时,曲线捏缩现象较试件 S-1 轻微,试件 S-2 的纵筋与混凝土之间产生的黏结滑移现象更少,且证明承插槽内墩柱锚固良好,未发生转动等现象。

如图 15(c) 所示的试件 S-3 滞回曲线与前 2 组试件相比,滞回环面积减小,曲线达到峰值承载力后下降较试件 S-1 与 S-2 更快,并表现出明显的捏缩现象,其主要包含了两部分原因,一是由于墩柱自身墩底发生钢筋屈曲破坏导致的黏结滑移引起的,另一部分原因是墩柱-承台界面发生了翘起破坏,墩柱绕承台有一定的转动位移,因此表现出了明显的捏缩现象。

试件 S-4 滞回曲线如图 15(d) 所示,滞回曲线捏缩现象明显,滞回环面积与残余位移均较小,且试件在达到峰值后承载力迅速发生下降,表现出较其他 3 组试件更低的延性与耗能能力。其主要原因与其发生的破坏形式有关,墩柱混凝土轻微剥落,但承台出现翘起破坏,导致墩柱在承插位置有转动位移,因此其滞回曲线表现出承载力下降快、延性略差,呈现较小的残余位移的特点。而曲线出现严重的捏缩现象,与墩柱在承插槽位置发生一定的转动有直接关系。

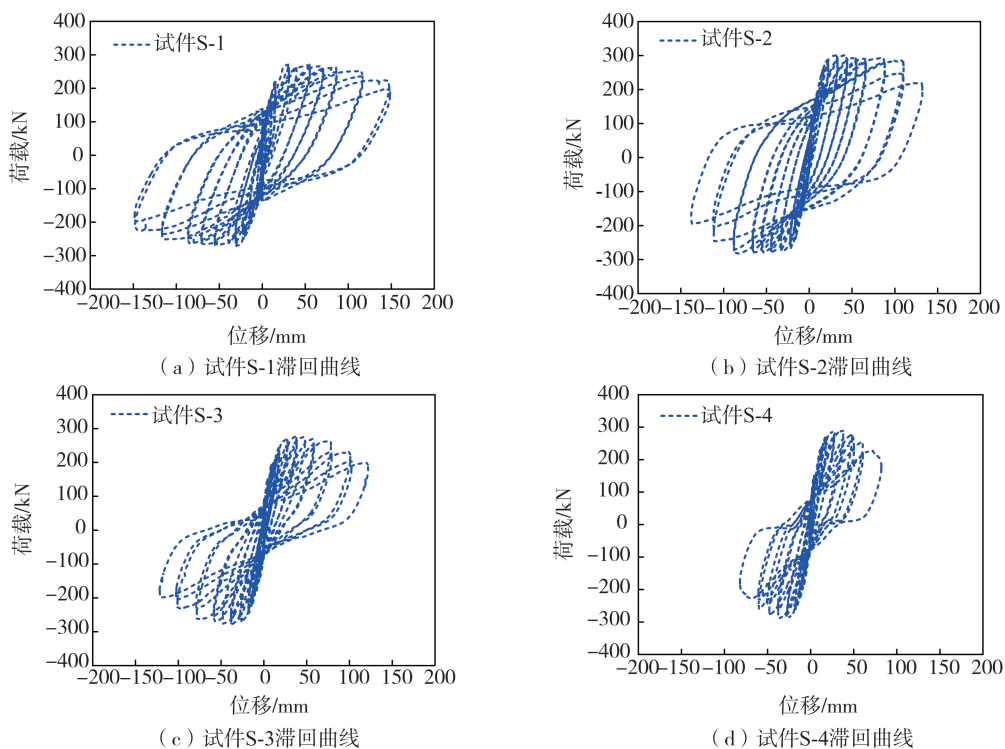


图 15 试件滞回曲线

Fig. 15 Hysteresis curves of specimens

### 3.2 骨架曲线

试件的骨架曲线如图 16 所示,试件 S-1、S-2、S-3、S-4 的峰值力为 272.80、292.82、279.58、290.25 kN,其中试件 S-2 试件的承载力最大,比试件 S-1 大 7.3%,承载力差距较小,因此试件的峰值承载力基本一致。

同时,由曲线可知,试件 S-1 从峰值荷载后曲线变化平缓,随着位移的增加,承载力下降缓慢,延性性能较好。试件 S-2 曲线在位移为 36~100 mm 范围内时,承载力基本保持不变,100 mm 后出现明显下降。试件 S-3 曲线在位移为 37~88 mm 范围内时,承载力变化较小,88 mm 后出现明显下降。试件 S-4 曲线在达到峰值荷载后均表现出比其他试件下降更快的趋势,而这也与试验现象相符合。曲线相关特征点列于表 2,并根据式(4)计算延性系数  $\mu$ 。

$$\mu = \frac{D_u}{D_y} \quad (4)$$

式中:  $D_u$  为极限位移;  $D_y$  为屈服位移。

根据计算结果,试件 S-1 的位移延性系数为 7.98 略好于试件 S-2 的延性系数 7.06。而试件 S-4 的位移延性系数为 4.29,延性性能明显较其余试件更差。

表 2 试件的试验结果

Table 2 Experiment results of the specimens

试件	屈服位移/mm	屈服荷载/kN	峰值荷载/kN	极限位移/mm	延性系数 $\mu$
S-1	17.29	229.24	272.80	138	7.98
S-2	16.44	263.55	292.82	116	7.06
S-3	16.25	237.10	279.58	95	5.85
S-4	14.89	245.55	290.25	64	4.29

### 3.3 耗能能力

如图 17 所示,4 组试件的累计耗能曲线均呈现递增现象,在加载早期(2.0%纵漂比之前),曲线分布差异较小。试件 S-1 和 S-2 的累计耗能曲线相似,且在 6% 纵漂比时,试件 S-1 累计耗能为 399.10 kN·m,而试件 S-2 的累计耗能为 413.45 kN·m,二者数值相差 3.6%,试件 S-2 累计耗能略高于试件 S-1。在相同的纵漂比 4% 时,试件 S-1 为 196.60 kN·m,试件 S-2 为 252.3 kN·m。试件 S-2 比试件 S-1 高 28%。而试件 S-3 和试件 S-4 累计耗能为 151.16 kN·m 和 123.91 kN·m,比相同纵漂比下现浇结构耗能低 23% 和 37%。

曲线分布情况与试验现象相符,试件 S-3、试件 S-4 由于承台出现裂缝,墩柱绕承台发生一定的转动,导致整体耗能小于其他 2 组试件。其中试件 S-3 由于承插深度高于试件 S-4,且墩柱塑性铰区产生一定程度的破坏,因此其耗能能力强于试件 S-4。

### 3.4 刚度退化

4 组试件的刚度退化曲线分布趋势类似,均呈现先快速下降,后下降趋势变缓的现象。反映了试件在开始遭受往复荷载的作用后损伤较快,导致刚度下降明显,随着加载位移的增大,试件的损伤增幅逐渐减小,所以刚度数值变化幅度减小。如图 18 所示,试件 S-1 的初始刚度为 25.01 kN/m,试件 S-2 的刚度为 36 kN/m,试件 S-3 的初始刚度为 38 kN/m,试件 S-4 的初始刚度为 32.7 kN/m,承插试件的初始刚度均略大于现浇结构。

综上所述,4 组试件的承载力基本接近,其中试件 S-2(承插深度为 1.0d)的承载力最高,比试件 S-1(现浇结构)高 7.3%。从破坏现象、滞回曲线分布、延性等方面对比,试件 S-2 均与试件 S-1

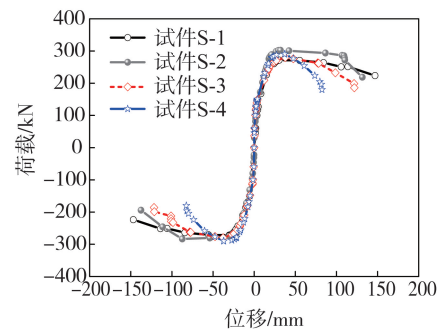


图 16 试件骨架曲线

Fig. 16 Skeleton curves of specimens

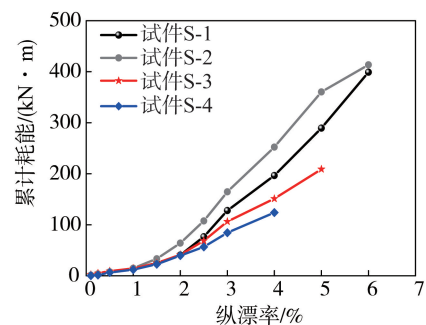


图 17 累计耗能

Fig. 17 Accumulate energy dissipation

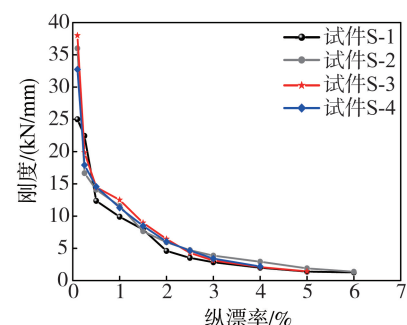


图 18 刚度退化

Fig. 18 Stiffness degradation

接近。在耗能方面较试件 S-1 更强,同时其初始刚度也更高,因此 1.0d 承插试件可以保证具有不弱于现浇结构的抗震性能。试件 S-3 与试件 S-1 相比,承载力接近,峰值荷载、屈服位移特征点基本一致,但由于墩柱、承台均产生破坏,因此延性性能弱于试件 S-1 和试件 S-2。试件 S-4 由于承插深度较浅,承台局部位置出现翘起破坏,导致试件达到峰值后承载力下降较快,4 组试件中,试件 S-4 的耗能能力、延性性能最弱。

## 4 结论

本文对 1 组现浇桥墩与 3 组具有不同承插深度的装配式桥墩进行拟静力试验,通过对比试验破坏现象、拟静力试验滞回曲线、骨架曲线、耗能以及刚度退化等方面,判断各试件的抗震性能,并分析出现不同破坏现象产生的原因,认为承插深度的选择受多重因素影响,建议在实际设计中根据墩柱的承载能力,结合承台插槽局部承载能力的相对大小设计承插槽深度并考虑适当的安全系数,得到以下结论:

1) 墩柱插入段不考虑其余剪力构造的承插 1.0d 墩柱破坏现象与现浇结构类似,均在墩底形成较大的塑性铰破坏;承插 0.8d 墩柱的墩柱与承台均发生损伤,而承插 0.6d 墩柱在承台位置发生翘起破坏。

2) 试验结果表明,在现有构造以及配筋率情况下,承插 1.0d 试件的抗震性能等同现浇试件。承插 0.8d 试件的特征点分布与现浇相似,但延性性能弱于现浇结构。承插 0.6d 墩柱的滞回抗震性能指标弱于其余 3 组试件。

3) 承插深度的选择与多种因素有关,墩柱与承台插槽侧壁的承载能力相互之间的大小关系是影响因素之一,在墩柱承载力不变的情况下(即配筋率不变的情况下),墩柱承插深度越小,承台越容易发生局部翘起破坏,设计中需考虑一定的安全系数,保证承台插槽侧壁承载能力足够。

## 参考文献:

- [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. (in Chinese)
- [2] 王利辉,程琪珉,张广达,等. 模块化预制拼装铁路实心桥墩抗震性能数值分析[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(1): 81-93.  
WANG Lihui, CHENG Qimin, ZHANG Guangda, et al. Numerical simulation of seismic performance of modular prefabricated railway solid bridge piers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(1): 81-93. (in Chinese)
- [3] 李慎,李容容,李晓蕾,等. 带悬臂梁段连接的装配式梁柱节点拟静力试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(4): 239-249.  
LI Shen, LI Rongrong, LI Xiaolei, et al. Quasi-static test of assembled beam-column joints with cantilever connections [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(4): 239-249. (in Chinese)
- [4] MITCHELL D, DEVALL R H, SAATCIOGLU M, et al. Damage to concrete structures due to the 1994 Northridge earthquake[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(2): 361-377.
- [5] SI X L, ZHANG G D, SONG Y C, et al. Evaluation of seismic performance and damage characteristics of column-footing joints with shallow socket connection[J]. Engineering Structures, 2024, 311:118172.
- [6] PARK R. Seismic design and construction of precast concrete buildings in New Zealand[J]. PCI Journal, 2002, 47(5): 60-75.
- [7] DAL LAGO B, TONIOLO G, LAMPERTI TORNAGHI M. Influence of different mechanical column-foundation connection devices on the seismic behaviour of precast structures[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14(12): 3485-3508.
- [8] 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]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 192-198.  
GE Jiping, WANG Zhiqiang, LI Jianzhong, et al. Recent development in seismic performance of prestressed concrete precast segmental double-column piers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(3): 192-198. (in Chinese)
- [9] 黄海,龚良勇,胡淑军,等. 一种新型全装配式混凝土梁柱-钢支撑组合节点的抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(3): 198-209.  
HUANG Hai, GONG Liangyong, HU Shujun, et al. Seismic performance analysis for an innovative precast concrete beam and column-to-steel brace composite joint[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(3): 198-209. (in Chinese)
- [10] HAN Q, LI X P, XU K, et al. Shear strength and cracking mechanism of precast bridge columns with grouted sleeve connections[J]. Engineering Structures, 2021, 230: 111616.
- [11] ZHENG G Y, KUANG Z P, XIAO J Z, et al. Mechanical performance for defective and repaired grouted sleeve connections under uniaxial and cyclic loadings[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233: 117233.
- [12] 李晓鹏,张广达,韩强,等. 灌浆套筒连接预制拼装桥墩抗剪强度影响因素分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(6): 71-81.  
LI Xiaopeng, ZHANG Guangda, HAN Qiang, et al. Influencing factor analysis on shear strength of precast columns with grouted sleeves [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(6): 71-81. (in Chinese)

- [13] CHEN J, CHEN X L, DING F X, et al. Mechanical performance of overlap connections with grout-filled anchor reinforcements in embedded metal corrugated pipe[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20(4):128.
- [14] 邱宏强, 夏樟华, 朱三凡, 等. 预应力灌浆波纹管预制拼装桥墩抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(1): 144-153.  
QIU Faqiang, XIA Zhanghua, ZHU Sanfan, et al. Seismic performance analysis of prestressing prefabricated bridge piers with grouting bellows[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(1): 144-153. (in Chinese)
- [15] 屈宏雅, 肖纬, 李田田. 基于新型波纹管连接构造的预制拼装桥墩地震破坏机理的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(5): 193-198.  
QU Hongya, XIAO Wei, LI Tiantian. Experimental study on the seismic performance of a new connection design for precast bridge pier[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(5): 193-198. (in Chinese)
- [16] SI X L, WEN J N, ZHANG G D, et al. Seismic performance of precast double-column pier with UHPC-filled socket connections[J]. Engineering Structures, 2023, 285: 115618.
- [17] 钱辉, 叶晨阳, 李宗翱, 等. 自复位承插式多节段预制桥墩抗震性能理论分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 35-43.  
QIAN Hui, YE Chenyang, LI Zongao, et al. Theoretical analysis on seismic performance of re-centering socketed segmental precast pier[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(1): 35-43. (in Chinese)
- [18] 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 for seismic performance of the prefabricated concrete pier system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(12): 56-76. (in Chinese)
- [19] 韩强, 贾振雷, 何维利, 等. 自复位双柱式摇摆桥梁抗震设计方法及工程应用[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 169-177.  
HAN Qiang, JIAZhenlei, HE Weili, et al. Seismic design method and its engineering application of self-centering double-column rocking bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 169-177. (in Chinese)
- [20] 李宁, 王苏安, 范佩东, 等. 空心节段预制拼装 RC 桥墩的多维抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(6): 76-85.  
LI Ning, WANG Su'an, FAN Peidong, et al. Experimental study on multi-dimensional seismic performance of rectangular hollow section precast segmental RC bridge column[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(6): 76-85. (in Chinese)
- [21] ZENG Z, XU Y, YAN H, et al. Design verification of a new socket partially embedded connection between precast rectangular columns and stepped pile caps[J]. Journal of Bridge Engineering, 2023, 28(2): 04022150.
- [22] OSANAI Y, WATANABE F, OKAMOTO S. Stress transfer mechanism of socket base connections with precast concrete columns[J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(3): 266-276.
- [23] CANHA R M F, JAGUARIBE K D, EL DEBS ALHD, et al. Analysis of the behavior of transverse walls of socket base connections[J]. Engineering Structures, 2009, 31(3): 788-798.
- [24] CHENG Z, SRITHARAN S. Side shear strength of preformed socket connections suitable for vertical precast members[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(5): 04019025.
- [25] 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.
- [26] LIU B D, ZHANG LL, SUN H B, et al. Side shear strength and load-transfer mechanism of corrugated steel column-foundation socket connection[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01377.
- [27] 张智然, 卢永成, 齐新, 等. 承插式预制实体矩形截面桥墩抗震性能研究[J]. 结构工程师, 2022, 38(4): 128-133.  
ZHANG Zhiran, LU Yongcheng, QI Xin, et al. Study on seismic performance of precast solid rectangular piers with socket connection[J]. Structural Engineers, 2022, 38(4): 128-133. (in Chinese)
- [28] 齐新, 卢永成, 邵长宇, 等. 新型承插式矩形墩柱的抗震性能研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(2): 39-46.  
QI Xin, LU Yongcheng, SHAO Changyu, et al. Study on seismic performance of rectangular pier with new-type socket connection[J]. Bridge Construction, 2022, 52(2): 39-46. (in Chinese)
- [29] 徐艳, 童自亮, 曾增, 等. 灌浆料对预制拼装承插式桥墩力学性能的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 84-91.  
XU Yan, TONG Ziliang, ZENG Zeng, et al. Influence of grout on the mechanical performance of prefabricated assembled socket bridge pier[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 84-91. (in Chinese)
- [30] 晋智斌, 陈科, 陆军. 预制浅承插式高强混凝土空心桥墩抗震性能试验[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 128-139.  
JIN Zhibin, CHEN Ke, LU Jun. Seismic performance of precast hollow high-strength concrete bridge columns with shallow socket connection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 128-139. (in Chinese)
- [31] 韩艳, 董嘉雯, 王龙龙, 等. 承插式装配桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(5): 63-70.  
HAN Yan, DONG Jiawen, WANG Longlong, et al. Quasi-static test and numerical simulation for seismic performance of prefabricated assemble bridge piers base on socket connection[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(5): 63-70. (in Chinese)
- [32] ZHOU X Y, NIE X, XU S Q, et al. Experimental studies on seismic performance of socket connections with shear keys and inner and outer filled reinforced concrete[J]. Engineering Structures, 2022, 273: 115021.
- [33] XU Y, ZENG Z, WANG Z G, et al. Experimental studies of embedment length of precast bridge pier with socket connection to pile cap[J]. Engineering Structures, 2021, 233: 111906.
- [34] SADEGHIAN P, FAM A. Closed-form model and parametric study on connection of concrete-filled FRP tubes to concrete footings by direct embedment[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137(5): 346-354.