

# 承插式预制拼装桥墩的最小合理承插深度

徐 艳<sup>1</sup>, 曾 增<sup>1</sup>, 葛继平<sup>2</sup>, 王志刚<sup>3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海 201418;

3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430058)

**摘要:** 预制桥墩和承台采用承插式连接即直接将预制桥墩插入承台预留槽中,并用灌浆料填缝形成整体的桥墩-承台连接构造,这种连接的特点在于施工精度要求相对低,施工工序简单,现场作业量少.其力学性能取决于桥墩的插入深度和接缝灌浆料的粘结性能.以实际工程为研究背景,对采用不同承插深度的试件进行拟静力试验以及基于 OpenSEES 的数值模拟,通过分析和比较,研究承插深度对整个桥墩力学性能的影响,并结合公式推导提出最小合理承插深度建议值,为实际工程提供设计指导.

**关键词:** 预制拼装; 承插式; 承插深度; 桥墩; 承台

**中图分类号:** U443.22

**文献标志码:** A

## Minimum Reasonable Socket Depth of Precast Pier-footing with Socket Connection

XU Yan<sup>1</sup>, ZENG Zeng<sup>1</sup>, GE Jiping<sup>2</sup>, WANG Zhigang<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 3. China Communications Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430058, China)

**Abstract:** Socket connection is an approach to connect precast members by inserting the pier directly into a pre-opened socket of the footing that is precast or cast in site construction, and sealing with high strength non-shrink grout. The significant advantages of this connection are low alignment accuracy, simple construction and less on-site workload. Its mechanical performance highly depends on the socket depth of the pier and the bond property of grout. Therefore, quasi-static test of specimens designed from a real bridge with different socket depth was conducted together with the numerical simulation by OpenSEES, to study the influence of socket depth on the seismic performance of the bridge pier. The minimum reasonable socket depth was proposed based on the results experimentally and numerically,

providing a reliable guidance for such pier design.

**Key words:** prefabrication and assembly; socket connection; socket depth; pier; footing

为了响应国家对“积极推进建筑工业化”的号召,特别是“十九大”确定的生态文明建设的总体指导思想,新型建筑工业化已经成为我国建筑业的必然发展方向,工业化的预制拼装桥梁施工技术是实现桥梁工程快速施工的重要途径之一.2013年,美国华盛顿州 SR520 公路的 interstate 5 号公路桥梁采用了承插式连接技术<sup>[1]</sup>;2016年,我国上海嘉闵高架北二段桥梁的一座匝道桥中也采用了承插式连接构造.

相比于实际桥梁工程应用,关于承插深度的理论研究则开展的更早.日本学者 Osanai 等<sup>[2]</sup>研究了建筑结构的柱-基础承插式连接,提出至少  $1.5D$  ( $D$  为桥墩横截面尺寸)才能满足要求. Mashal 和 Palermo<sup>[3]</sup>以新西兰一座 16 m 跨径的典型高速公路桥梁为背景,研究了预制桥墩与预制基础之间的承插式连接,表明  $1.0D$  的承插深度与整体现浇体系表现出相类似的特点. Khaleghi 等<sup>[1]</sup>将扩大基础-预制墩柱承插式连接应用到排架墩桥梁中,且认为若墩柱埋深大于等于  $1.0D$ ,预制混凝土墩柱与基础连接的性能会等于或好于现浇混凝土桥墩. Mohebbi 等<sup>[4]</sup>和 Restrepo 等<sup>[5]</sup>在循环荷载作用下测试了多个缩尺比为  $1:2.4$  的桥墩-盖梁节点,结果表明  $1.2D$  的承插深度可以使得塑性铰形成于墩柱而不是盖梁. Motaref<sup>[6]</sup>和 Kavianipour<sup>[7]</sup>研究了预制桥墩与预制基础之间的承插式连接,并且用高强水泥浆填充节点缝隙.结果表明,  $1.5D$  的承插深度足以将桥墩完全固定于基础. Haraldsson 等<sup>[8]</sup>研究了预制桥

收稿日期: 2019-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(51878492;51978511);国家重点研发计划项目(2017YFC0806000)

第一作者: 徐 艳(1976—),女,副研究员,博士生导师,工学博士,主要研究方向为桥梁抗震. E-mail: yanxu@tongji.edu.cn

墩与现浇基础承插式连接的抗震性能,对比了  $1.1D$  与  $0.5D$  的试验结果,发现  $0.5D$  试件发生了冲剪破坏且基础严重开裂,而  $1.1D$  的嵌入长度足以保证在循环荷载作用下只有桥墩会发生破坏而基础完好,认为承插深度至少应为  $1.0D$ 。Mehrsorush 等<sup>[9]</sup>和 Mehraein 等<sup>[10]</sup>研究了桥墩与盖梁的承插式连接,结果表明  $1.0D$  的嵌入长度足以确保内力的传递以及在墩柱上形成塑性铰。Saiidi 等<sup>[11-12]</sup>先后进行了大比例单柱预应力墩和双柱墩的振动台试验,墩柱与盖梁、基础承台均为承插式连接,前者承插深度为  $1.0D$ ;后者墩柱-盖梁承插深度为  $1.0D$ ,墩柱-承台承插深度为  $1.36D$ 。试验验证了该承插深度的可靠性,塑性铰形成于桥墩且连接处不发生破坏。李永波<sup>[13]</sup>对现浇和承插式两种桥墩进行拟静力试验比较,结果表明, $1.1D$  的承插深度可以达到与现浇桥墩接近的抗震性能,且最大水平承载能力还略高于现浇桥墩。

事实上,对于预制桥墩-承台的承插式连接方式,承台厚度受到很多因素的影响,如承台配筋、承台混凝土强度和承插深度及其细部构造等,其中承插深度的大小更为直接地影响承台厚度,也就是下部基础的工程经济性。国内关于承插深度的相关内容仅在《铁路装配式小桥涵技术规则》<sup>[14]</sup>和《建筑地基基础设计规范》<sup>[15]</sup>中有所提及,前者 4.0.3 条中给出柱坑锚固深度的计算公式和杯形接头柱坑基底冲切应力的计算公式,以此可确定承插深度至少是  $1.4D$ ;后者 8.2.4 条提出预制混凝土柱与杯口基础的连接应满足表 8.2.4-1 以及 8.2.4-2 的要求,其中规定了柱的插入深度、基础的杯底厚度和杯壁厚度,以此可确定承插深度至少是  $0.8D$ 。显然,有关预制桥墩-承台承插式连接的承插深度还缺乏必要的理论和试验研究结果,因此无法得出最小合理承插深度建议值。

本文以实际工程应用作为背景,通过试验研究与数值模拟,对比分析承插式预制试件和整体现浇试件在水平往复荷载作用下的滞回性能、损伤发展以及破坏形态,研究承插深度对预制桥墩抗震性能的影响,提出最小合理承插深度建议值。

## 1 工程简介及模型设计

本文背景工程取自湖北监利至江陵高速公路东延段项目中 30 m 跨径、墩高 10 m 的连续小箱梁桥,该桥墩考虑采用离心工艺预制的空心管墩柱,且墩

台之间考虑采用承插式连接。本文按照 1:2 的几何缩尺比进行了试验研究。研究对象共计 5 个试件,即 S1~S5。S1 为整体现浇试件(图 1a),作为预制拼装试件的比较基准;S2 为承插式预制试件(图 1b),是与实际工程设计预案对应的试件,承插深度  $0.7D$ ;S3、S4、S5 分别为  $0.5D$ 、 $1.0D$ 、 $1.5D$  承插深度的承插式预制试件。对于 S2~S5,承台中心预埋波纹管<sup>[16]</sup>,波纹管规格为 D800,壁厚 1.6 mm,波形 68 mm×13 mm。另外预制墩柱的承插段为锯齿状。待预制桥墩插入承台预埋波纹管中时,浇筑高强无收缩水泥灌浆料。

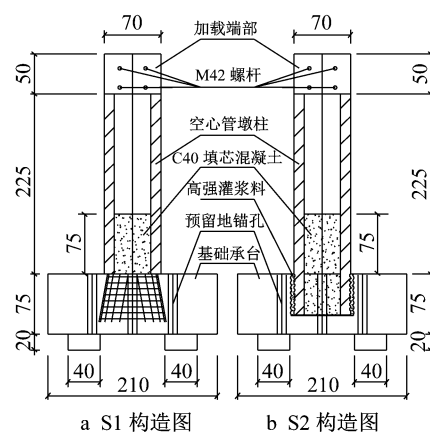


图 1 试件构造图(单位:cm)

Fig.1 Configuration of specimens (unit: cm)

## 2 承插式桥墩-承台的数值建模

本文采用 OpenSEES 进行数值模拟,其关键在于能否反应承台对不同插入深度的管墩的约束作用,并考虑填缝灌浆料的粘结性能。由于灌浆料为 M80 高强无收缩水泥砂浆,其力学性能类似于混凝土,强度主要在于抗压强度而不考虑其抗拉强度,因此可以认为只受压不受拉。

### 2.1 桥墩-承台的力学模型

考虑到桥墩与基础承台的承插式连接与桩土结构相互作用相似,而桩在水平荷载作用下的分析常用的是地基反力系数法,这一方法是基于文克勒地基模型,把承受水平荷载的单桩视作弹性地基(由水平向弹簧组成)中的竖直梁,通过求解梁的挠曲微分方程计算桩身弯矩、剪力以及桩的水平承载力。承台通过灌浆料对承插段管墩的约束作用与桩周土严重风化后对嵌岩桩的约束作用极为相似,其水平承载能力仅靠嵌岩段提供,因此可以参考规范<sup>[17]</sup>中关于嵌岩桩的相关规定来模拟管墩的边界条件以计算承

插孔壁的分布力。

综上,预制管墩部分采用非线性纤维单元进行模拟;承插式连接部分借鉴桩土作用的弹簧来模拟,并假设基础承台绝对刚性,桥墩周围与承台之间采用水平弹簧单元连接,通过不同弹簧数目来考虑不同承插深度对桥墩力学性能的影响,桥墩底部则采用竖向弹簧单元连接模拟承台底板对桥墩竖向的约束作用,如图 2 所示。图中, $H$  为水平力, $N$  为轴压力。其中模拟灌浆料的弹簧采用只受压不受拉的 ENT(elastic-no tension)材料<sup>[18]</sup>。

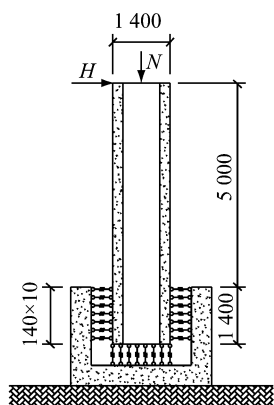


图 2 力学模拟示意图(单位:mm)

Fig.2 Mechanical model(unit: mm)

弹簧参数的确定是数值模拟的关键。弹簧模拟分两个部分,即水平弹簧和竖向弹簧。其中水平弹簧包含水平轴向刚度用于模拟孔壁的水平约束作用以及竖向剪切刚度用于模拟剪力键和摩擦力的竖向约束作用,竖向弹簧只含竖向轴向刚度用于模拟墩柱端部的支承作用。由于本文假定墩柱端部可以滑动,因此不考虑墩柱端部的水平剪力提供的水平约束作用。鉴于竖向刚度会影响水平刚度,而水平刚度对竖向刚度影响很小,因此先确定竖向刚度再确定水平刚度。对于竖向刚度,首先根据试件的竖向加载曲线分别得到竖向弹簧的轴向刚度  $1.9 \times 10^2 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$  和水平弹簧的剪切刚度  $1.3 \times 10^2 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

对于水平刚度,因为承插深度比桩的埋深小得多,可以认为承插段的横向约束来自同一个土层,即各个水平弹簧取为等刚度。此外,水平弹簧刚度的大小直接影响桥墩的加载曲线,因此可以依据试验的加载曲线定出其刚度值;另一方面,弹簧刚度偏大则会导致承插壁的应力集中于承台顶部且应力值极大,与实际情况不符。因此需要结合试验现象综合确定弹簧刚度。以 S2 为例,如图 3 所示,通过试算可得水平弹簧轴向刚度为  $1.6 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$  时,数值模拟与试验结果相吻,且孔壁最大应力约为 66

MPa,与试验现象一致。

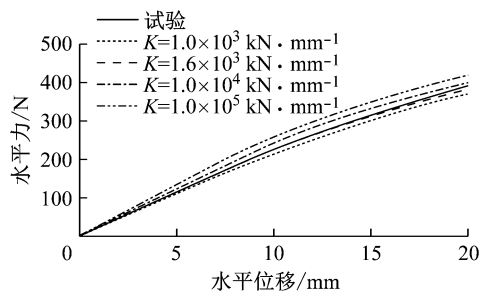


图 3 初始刚度

Fig.3 Initial stiffness

## 2.2 材料本构关系

桥墩墩身为 C70 预制管墩,外径为 140 cm,壁厚 25 cm。外缘环向均匀布置竖向钢筋  $36 \Phi 28$ ,净保护层厚度为 3.4 cm;内缘环向均匀布置竖向钢筋  $18 \Phi 16$ ,净保护层厚度为 3.1 cm;内外缘布置箍筋  $\Phi 10$ ,竖向间距为 10 cm。

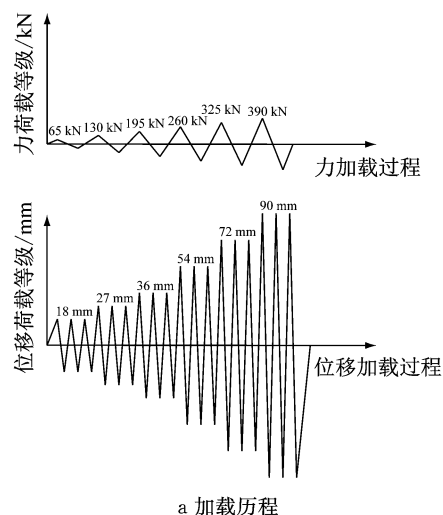
OpenSEES 中常用 Steel02<sup>[19]</sup> 来模拟钢筋本构关系,研究表明该本构关系能充分体现出试验滞回曲线的捏拢效应和大位移加载下的强度退化效应,模拟的滞回曲线更加圆滑且与试验结果接近。对于混凝土的模拟则是常采用 Concrete02<sup>[20]</sup>,该本构关系的参数较少但物理意义明确,最重要的是能够考虑加载和卸载过程的刚度退化,以及混凝土材料的滞回耗能,其本构模型可在相关文献中获取,此处不再赘述。其中混凝土包含非约束混凝土和约束混凝土两种,非约束混凝土本构关系按照材料试验的特征值确定,而约束混凝土本构关系则需根据材料试验以及 mander 约束混凝土本构模型确定。

## 2.3 加载方案设计

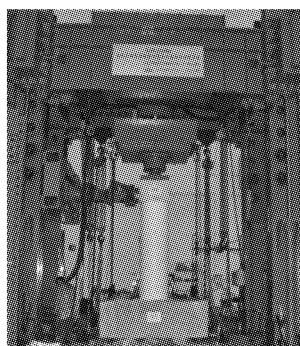
墩柱的轴压比对桥墩的抗震性能有很大影响,需要准确模拟。通过计算得到原型桥墩在恒载作用下的墩柱轴力以及模型的恒载轴力,最终确定试验试件的竖向荷载为  $7734/4=1933.5 \text{ kN}$ 。即先对墩柱施加此竖向设计轴力再施加横向循环位移荷载,加载方案如图 4 所示。水平加载初期采用力控制,待钢筋屈服或者荷载位移曲线出现明显转折后采用位移控制,直到试件达到指定的位移或者荷载下降到最大荷载的 85%。

## 3 数值模拟与试验验证

如图 5 所示,数值计算与试验结果拟合得较好,滞回曲线形状、初始刚度、加载刚度、卸载刚度、极限



a 加载历程



b 实际加载装置图

图 4 加载方案

Fig.4 Loading plan

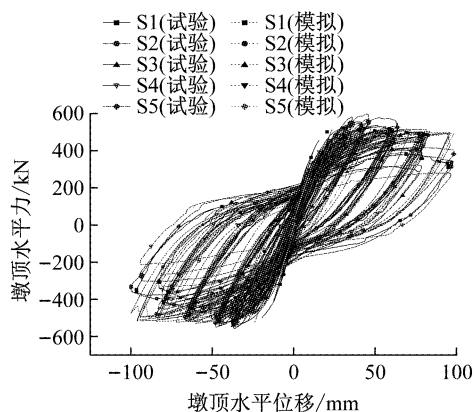


图 5 滞回曲线

Fig.5 Hysteretic curve

荷载、极限位移以及峰值荷载均较为接近,但在强度退化方面存在差异,这主要因为数值模拟材料不能准确地考虑材料损伤引起的刚度退化。总体而言,各个试件在弹性阶段,表现为滞回曲线的集中和重叠;随着混凝土开裂、钢筋屈服、混凝土受压剥落等损伤破坏现象的产生,滞回环逐渐拉开,耗能增强。

此外,图 6 给出了桥墩截面最外侧钢筋弹性阶段的应变分布曲线。离心工艺导致应变片损坏较为

严重。另外,当试件进入塑性阶段之后应变片破坏更为严重,因此无法测得塑性状态下的应变分布。显然,钢筋发生最大应变的位置在桥墩与承台的交界面上,且各试件的塑性区高度均大约为 0.5 m,这与钢筋实测应变分布以及试验观察现象(图 7,仅以 S1 和 S2 作为示例)是吻合的。值得注意的是,尽管应变片的实测环境恶劣导致实测值有所偏差甚至不可信,而应变的数值模拟值又偏于理想,这导致两者在局部看似有所不同,但是本质规律是相符的。

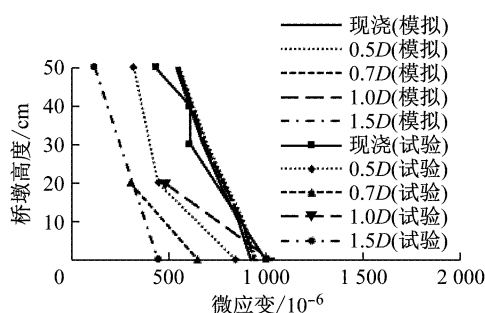


图 6 钢筋应变分布曲线(加载至 260 kN)

Fig.6 Strain distribution of bar (loading to 260 kN)

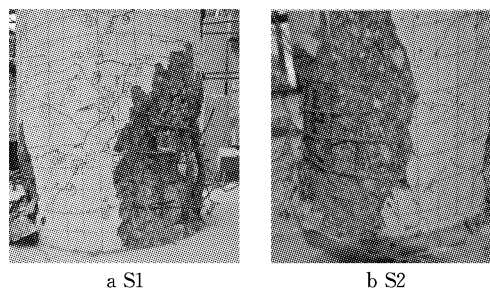


图 7 桥墩破坏示意图

Fig.7 Damage of the piers

## 4 最小合理承插深度的理论分析

根据第 3 节分析可知,本文研究的承插深度对于桥墩抗震性能的影响不大。经计算发现,承插深度主要影响的是承插孔壁应力分布。事实上,不同的承插深度意味着单位面积的灌浆料所承受的局部应力大小不同。显然,局部应力将随着承插深度减小而增大,即承插深度小则灌浆料更容易破坏。试验结束后对 S2~S5 的接缝进行了检查,发现 S2、S4 和 S5 的接缝完整性良好,几乎没有损伤,仅有表面浮浆脱落。相较之下,S3 的接缝则留下了灌浆料受压隆起的痕迹。这一现象验证了承插深度对承插孔壁应力的影响。

根据承插孔壁应力分布曲线(图 8)可知,当承插深度达到一定程度以后应力分布趋于稳定且应力值

较小,这也说明了存在一个最小合理承插深度来保证承插式连接的可靠性.另外,承插孔壁最大应力均小于 100 MPa,即高强无收缩水泥灌浆料的强度<sup>[21]</sup>,所以仅凭最大应力无法确定最小合理承插深度.从图 8 和图 9(图中分三个阶段)中可以看出 0.5D~0.7D 大致上是呈现直线型分布,意味着墩身变形表现出刚性梁特征,这与嵌岩桩<sup>[17]</sup>和承插柱<sup>[14]</sup>的壁应力分布相似;而 0.7D~1.5D 呈现为曲线型分布,意味着墩身变形表现出弹性梁特征,即承插深度过大导致约束作用偏大.

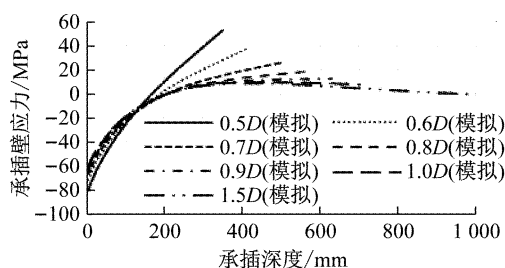


图 8 承插孔壁应力分布曲线

Fig.8 Stress distribution curve of socket wall

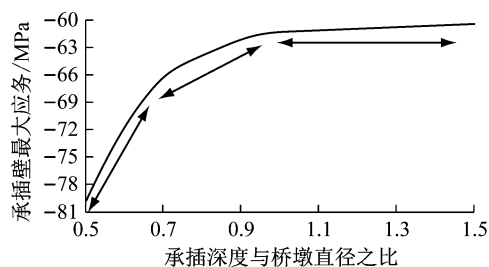


图 9 承插孔壁最大应力分布曲线

Fig.9 The maximum stress distribution curve of socket wall

根据规范<sup>[17]</sup>条文说明 5.3.5,参照嵌岩桩嵌入基岩中深度的计算公式估算可得 0.75D(考虑了安全系数);此外,根据规范<sup>[14]</sup>第 4.0.3 条,参照柱坑锚固深度的计算公式估算可得 0.53D,且需大于 1.4D(已有工程案例取值一般在 1.4D 左右,这一取值是偏保守的).显然上述规范<sup>[14,17]</sup>计算结果是相近的,原因在于两者均假定壁应力对称线性分布(图 10).图中, $M_H$  为嵌岩柱顶的弯矩, $d$  为桩径, $h$  为嵌固深度, $p$  为桩侧压力.

就嵌岩桩而言,当达到一定嵌入深度之后,继续增大的嵌入深度将不能充分发挥作用,因此规范给出假定压力分布为直线型时的推荐嵌入深度.由图 9 的承插孔壁最大应力分布曲线可知,曲线大致分为三个阶段:第一阶段(0.5D~0.7D),随着承插深度

增大,最大应力显著减小;第二阶段(0.7D~1.0D),随着承插深度增大,最大应力减小趋于变缓;第三阶段(1.0D~1.5D),随着承插深度增大,最大应力基本不变.显然,0.7D 的承插深度能保证连接性能且能发挥较高的效率.这与文献[8]中至少保持 1.0D 的结论有所不同,这是因为国外所研究的承插式连接的桥墩端部几乎都不设置底板,竖向支承完全由孔壁的摩擦力来提供,如果承插深度不够将使得竖向承载力不足并且导致桥墩发生冲剪破坏;而本次试验试件均设置了端承底板,这使得竖向承载力得到了保证.从本次试验结果来看,各个承插式试件均未发生冲剪破坏,这意味着在竖向承载力足够的情况下承插深度可以小于 1.0D.因此可认为在合理构造措施且保证灌浆料粘结良好的情况下,0.7D 的承插深度可以作为最小合理承插深度推荐值.

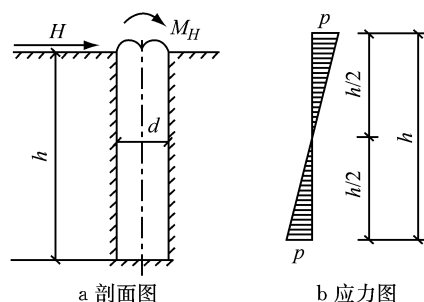


图 10 桩壁压力分布图

Fig.10 Pressure distribution of pile wall

## 5 结论

本文设计制作了 1 个现浇桥墩和 4 个不同承插深度的承插式预制桥墩,通过数值模拟和拟静力试验,研究了在水平往复荷载作用下,不同承插深度桥墩的力学性能、破坏模式和抗震性能,提出了最小合理承插深度,可为工程应用提供参考.主要结论如下:

(1) 试验结果表明不同承插深度的承插式试件的抗震性能与现浇试件基本一致,其中 0.7D 试件最为接近.

(2) 试验结果与数值模拟均表明在灌浆料粘结良好的情况下,本文研究的承插深度对于桥墩总体的抗震性能影响不大,产生的破坏模式和塑性铰区域与现浇试件是一致的.

(3) 随着承插深度的增大,墩身变形符合嵌岩桩的变形特点,可以参照嵌岩桩嵌入基岩的深度给出可参考的最小合理承插深度.

## 参考文献:

- [1] KHALEGHI B, SCHULTZ E, SEGUIRANT S, *et al.* Accelerated bridge construction in Washington State: from research to practice [J]. *PCI Journal*, 2012, 57(4):34.
- [2] OSANAI Y, WATANABE F, OKAMOTO S. Stress transfer mechanism of socket base connection with precast concrete column [J]. *Journal of Structural & Construction Engineering*, 1996, 93(3):107.
- [3] MASHAL M, PALERMO A. Quasi-static cyclic testing of half-scale fully precast bridge substructure system in high seismicity [C]// *Towards Integrated Seismic Design*. Auckland: NZSEE Conference, 2014:1-9.
- [4] MOHEBBI A, SAIID M, ITANI A. "Development and seismic evaluation of pier systems w/pocket connections, CFRP tendons, and ECC/UHPC columns" Rep. No. CCEER- 17-02 [R]. Reno: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, 2017.
- [5] RESTREPO J I, TOBOLSKI M J, MATSUMOTO E E. Development of a precast bent cap system for seismic regions [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2011.
- [6] MOTAREF S. Seismic response of precast bridge columns with energy dissipating joints [D]. Reno: University of Nevada. Department of Civil and Environmental Engineering, Center for Civil Engineering Earthquake Research, 2011.
- [7] KAVIANIPOUR F. Experimental and analytical seismic studies of a four-span bridge system with composite piers [D]. Reno: University of Nevada. Department of Civil and Environmental Engineering, Center for Civil Engineering Earthquake Research, 2013.
- [8] HARALDSSON O S, JANES T M, EBERHARD M O, *et al.* Seismic resistance of socket connection between footing and precast column [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(9):910.
- [9] MEHRSOROUSH A, SAIIDI M S. Cyclic response of precast bridge piers with novel column-base pipe pins and pocket cap beam connections [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(4):04015080.
- [10] MEHRAEIN M, SAIIDI M. "Seismic performance of bridge column-pile-shaft pin connections for application in accelerated bridge Construction." Rep. No. CCEER-16-01 [R]. Reno: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, 2016.
- [11] MOHEBBI A, SAIIDI M S, ITANI A M. Shake table studies and analysis of a PT-UHPC bridge column with pocket connection [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(4):04018021.
- [12] MOHEBBI A, SAIIDI M S, ITANI A M. Shake table studies and analysis of a precast two-column bent with advanced materials and pocket connections [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(7):04018046.
- [13] 李永波. 承插式和插槽式连接预制拼装桥墩[D]. 上海: 同济大学, 2015.
- LI Yongbo. Seismic performance analysis of socket and pocket connections for precast concrete columns [D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [14] 中华人民共和国铁道部. 铁路装配式小桥涵技术规则: TBJ 107—1992[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.
- Ministry of Railways of the People's Republic of China. Technical rules for railway fabricated small bridges and culverts: TBJ 107—1992 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 1992.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [16] 中国国家标准化管理委员会. 冷弯波纹钢管: GB/T 34567—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Standardization Administration. Cold-formed corrugated steel pipes: GB/T 34567—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [17] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG D63—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts: JTG D63—2007[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [18] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, *et al.* OpenSees command language manual [M]. Berkeley: University of California, 2007.
- [19] 张耀庭, 赵璧归, 杜晓菊, 等. 基于纤维模型的 RC 结构的钢筋本构关系研究 [J]. 湖南大学学报(自科版), 2015, 42(9): 23.
- ZHANG Yaoting, ZHAO Bigui, DU Xiaojie, *et al.* Research on the constitute models of steel for reinforced concrete structures based on the fiber model [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(9):23.
- [20] 刘春燕. 基于 OpenSees 的单轴混凝土本构模型的实现 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- LIU Chunyan. The realization of the uniaxial constitutive model of concrete based on OpenSees [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [21] 上海市城乡建设和管理委员会. 预制拼装桥墩技术规程: DG/TJ 08-2160—2015, J 12992—2015[S]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
- Commission of Urban-Rural Development and Management of Shanghai. Technical specification for prefabricated bridge piers: DG/TJ 08-2160—2015, J 12992—2015[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2015.