

# 外置耗能角钢承插式桥墩滞回性能研究

赵奇

(山东建筑大学交通工程学院, 山东 济南 250101)

**摘要:** 为提高承插式桥墩的抗震性能, 以单柱式桥墩为研究对象, 利用 ABAQUS 建立有限元模型。在承插式桥墩柱底与承台连接处设置外置耗能角钢, 与整体式桥墩、不设外置耗能角钢的承插式桥墩进行拟静力分析对比, 从滞回曲线和骨架曲线两方面, 分析结构的有效性和实用性。结果表明, 外置角钢的承插式桥墩与整体式桥墩抗震性能基本一致, 在桥墩柱底设置耗能角钢可以有效提高承插式桥墩的最大承载能力、刚度和耗能能力。

**关键词:** 承插式桥墩; 滞回曲线; 耗能角钢; 有限元模型

**中图分类号:** U443.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006—7973 (2021) 10—0158—03

装配式建筑具有现场施工时间短、结构质量高和生态环保等优点, 逐渐成为我国重要的施工方式。装配式桥墩是桥墩构件在预制场预制完成后, 运至施工现场装配、连接的桥墩结构。为了缩短施工工期, 提高施工质量, 大量装配式混凝土墩柱应用于公路桥梁工程中<sup>[1]</sup>。由于主要构件都是在预制场生产, 构件质量可控, 唯一需要注意的是构件连接接缝处的力学性能是否可靠。根据连接方式的差别导致的预制拼装桥墩与现浇式桥墩抗震性能的差异, 可将连接方式分为两大类, 即非等同现浇体系及等同现浇体系两类<sup>[2-3]</sup>。非等同现浇体系指后张预应力节段拼装式桥墩, 孙治国<sup>[4]</sup>、王震<sup>[5]</sup>等针对节段拼装式桥墩进行了大量研究。等同现浇体系主要有灌浆套筒连接、金属波纹管连接、插槽式连接和承插式连接等多种类型, 这一体系的特点是结构的受力机制与力学性能和现浇桥墩接近, 因此在抗震设防等级较高的地区有着很好的应用前景<sup>[6]</sup>。滞回曲线是指结构或构件在反复荷载作用下的荷载-变形的关系曲线, 是分析结构抗震性能的基础。它体现出结构在低周反复荷载作用下的变形情况、耗能能力以及刚度退化等性能特征, 是确定恢复力模型和进行非线性地震反应分析的依据<sup>[7]</sup>。本文提出在承插式连接的基础上, 在柱与承台连接处安装外置耗能角钢, 以提升桥墩的耗能和承载能力。为此本文利用 ABAQUS 有限元软件建立现浇式桥墩、承插式桥墩和外附耗能角钢承插式桥墩有限元模型, 探究外置耗能角钢对承插式桥墩滞回性能的影响, 分析外置耗能角钢承插式桥墩在实际应用中的可行性。

## 1 建立有限元模型并验证

为验证所建模型的正确性, 本文对文献<sup>[8]</sup>中的试

验模型进行数值模拟。文献<sup>[8]</sup>对整体式桥墩进行了试验, 试件由墩帽、柱身和承台三个构件组成, 示意图如图 1 所示, 尺寸如表 1 所示; 采用 C50 混凝土, 柱纵向设置 12 根直径 25mm 的 HRB400 钢筋, 箍筋由直径 12mm 和直径 16mm 的 HRB400 钢筋组成, 箍筋间距设置为 100mm, 材料特性如表 2 所示。

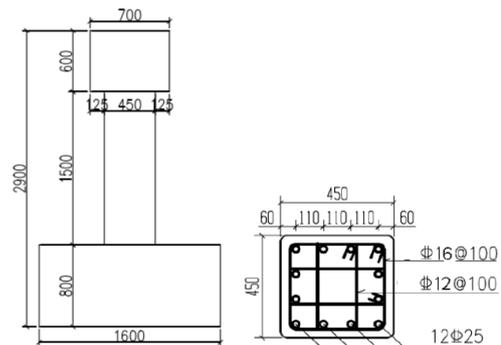


图 1 试验桥墩构件及柱体钢筋截面图

表 1 试件尺寸

部件名称	部件尺寸 (mm)
墩帽	700×700×600
承台	1600×900×800
墩身	450×450×1500
箍筋直径 1	16
箍筋直径 2	12
主筋直径	25

表 2 材料特性表

材料	屈服强度 (MPa)	极限强度 (MPa)	弹性模量 (MPa)
混凝土	—	46.5	34500
钢筋	445.12	615.05	205460

轴压比为 0.1, 竖向施加 715635N 的竖向轴压力, 水平加载采用控制位移的低周循环加载, 加载制度为  $0.3\Delta y$ ,  $0.6\Delta y$ ,  $1\Delta y$ ,  $1.5\Delta y$ ,  $2\Delta y$ ,  $3\Delta y$ ,  $4\Delta y$ ,  $5\Delta y$ ,  $6\Delta y$ ,  $7\Delta y$ 。其中,  $1\Delta y$  后每等级加载 3 次,  $\Delta y$

为屈服位移,  $\Delta y = 15.4\text{mm}$ 。试件滞回曲线如图 2 所示。

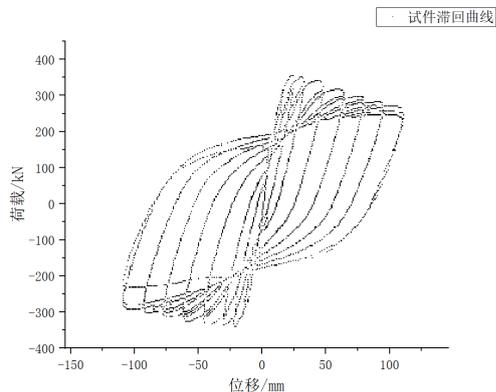


图 2 试件滞回曲线图

利用 ABAQUS 建立现浇式有限元模型, 其中混凝土本构关系采用塑性损伤模型, 单元采用 C3D8R 六面体单元, 钢筋本构关系采用方自虎基于双折线模型开发的钢筋本构模型<sup>[9]</sup>, 单元采用 T3D2 桁架单元; 不考虑钢筋与混凝土粘结滑移影响, 采用内置区域令钢筋与混凝土共同受力, 模型如图 3 所示。

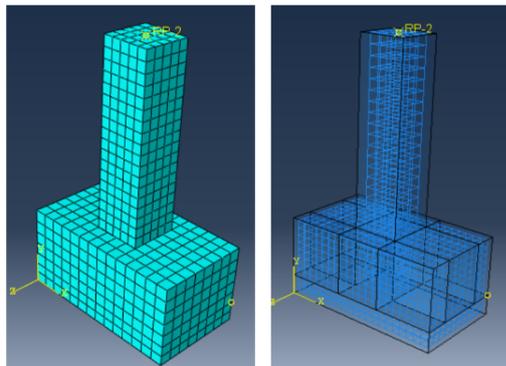


图 3 现浇桥墩有限元模型图

在柱顶施加上述轴压和水平位移加载曲线, 每个加载等级循环一次, 试件与有限元模型滞回曲线对比如图 4 所示, 由滞回曲线提取骨架曲线, 对比如图 5 所示。

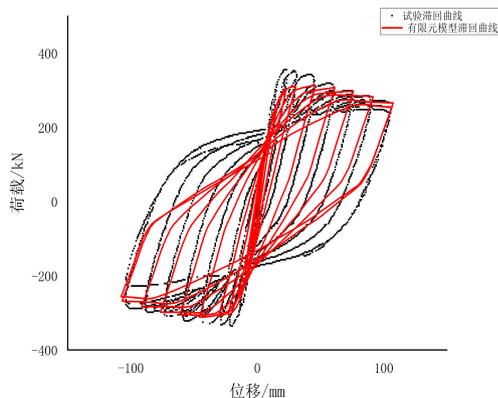


图 4 滞回曲线对比图

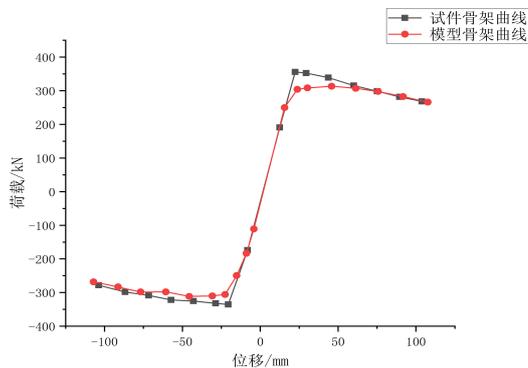


图 5 骨架曲线对比图

对比骨架曲线可知, 二者刚度退化趋势较为吻合, 最大误差为二者正向最大承载能力, 误差为 13.6%, 小于 15%, 满足精度要求, 说明本文数值模拟方法可较为准确地模拟试件的滞回性能, 可以进行后续建模分析工作。

## 2 装配式桥墩模型

承插式桥墩构造示意图如图 6 所示。预制构件及灌浆料均采用 C50 混凝土, 耗能装置采用型号为 L203 × 203 × 22.2, 长度为 300mm 的 Q195 角钢, 如图 7 所示, 在柱底四周设置共 4 个。采用建立整体式模型所用本构关系。

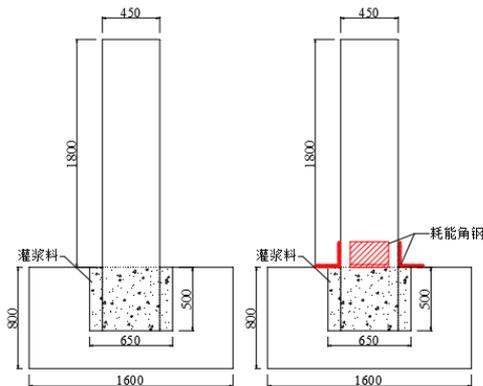


图 6 承插式及外置耗能装置的承插式桥墩

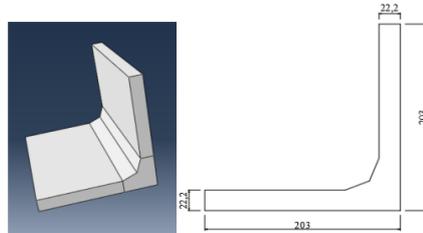


图 7 耗能角钢模型及尺寸图

采用内置区域约束将钢筋嵌入混凝土中; 耗能角钢

与柱、承台接触面采用绑定约束；灌浆料与预制构件间粘结良好，接触面采用绑定约束；考虑到实际工程中柱底与承台接触面采用水泥砂浆抹面，故柱与承台接触面法向方向采用“硬接触”，切向采用“罚”函数摩擦公式，摩擦系数设为0.1<sup>[10]</sup>，仍采用文献<sup>[8]</sup>中加载幅值，每级荷载只循环一次。三种桥墩滞回曲线数值模拟结果如图8所示。

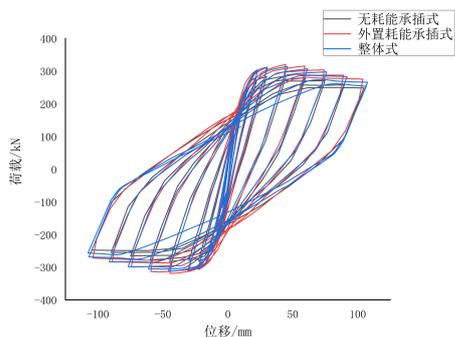


图8 三种桥墩滞回曲线对比图

提取骨架曲线如图9所示，计算得骨架曲线特征点如表3所示。

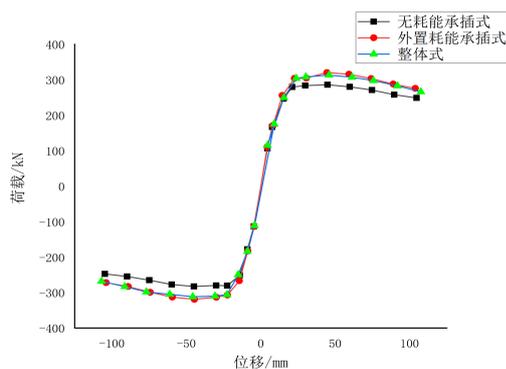


图9 三种桥墩骨架曲线对比图

表3 三种桥墩骨架曲线特征点

模型	屈服状态		最大承载力		极限状态	
	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN
整体式	15.60	250.00	45.90	313.30	107.61	265.89
外置耗能承插式	14.51	255.88	44.52	320.43	103.88	275.78
承插式	15.32	246.67	44.86	286.09	104.68	248.84

从图8可以看出，三者滞回曲线滞回环均为典型的弓形曲线，说明两种承插式桥墩是等同现浇体系桥墩；整体式桥墩和外置耗能装置承插式桥墩骨架曲线较为贴合，表明二者抗震性能接近，通过表3可知，无耗能装置的承插式桥墩承载力明显小于整体式桥墩，而外置耗能角钢的承插式桥墩最大承载力略大于整体式桥墩。

### 3 结论

对外置耗能角钢承插式桥墩、承插式桥墩和整体式桥墩的有限元数值模拟，通过对比三者的滞回曲线和骨架曲线，可以得出以下结论：

(1) 本文采用 ABAQUS 有限元软件可以有效模拟桥墩在低周循环荷载作用下的力学性能；

(2) 两种承插式桥墩为典型的等同现浇体系桥墩，力学性能与整体式桥墩接近；

(3) 设置耗能角钢的承插式桥墩与现浇式桥墩骨架曲线贴合程度较高，两者滞回性能基本一致；

(4) 对比不设耗能角钢承插式桥墩，柱底外置耗能角钢可以有效的提高承插式桥墩的最大承载力、刚度和耗能能力。

### 参考文献：

[1] 吴顺. 基于灌浆套筒式的装配式钢筋混凝土桥墩施工技术及应用研究 [J]. 公路工程, 2020, 45(03): 134-138.

[2] Yahya C. Kurama, Sri Sritharan, Robert B. Fleischman, Jose I. Restrepo, Richard S. Henry, Ned M. Cleland, S. K. Ghosh, Patricio Bonelli. Seismic-Resistant Precast Concrete Structures: State of the Art [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(4)

[3] 王景全, 王震, 高玉峰, 诸钧政. 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(03): 1-23.

[4] 孙治国, 赵泰仪, 石岩, 王东升. 摇摆-自复位桥墩抗震性能数值建模方法研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(06): 1357-1369.

[5] 王震. 自复位预制拼装 UHPC 空心墩抗震性能及设计方法研究 [D]. 东南大学, 2018.

[6] Cancan Yang, Pinar Okumus. Ultrahigh-Performance Concrete for Posttensioned Precast Bridge Piers for Seismic Resilience [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(12).

[7] 刘丰. 节段拼装预应力混凝土桥墩拟静力试验和分析研究 [D]. 同济大学, 2008.

[8] 刘传飞. 装配式桥墩 UHPC 连接节点力学性能研究 [D]. 华南理工大学, 2019.

[9] 方自虎, 甄翌, 李向鹏. 钢筋混凝土结构的钢筋滞回模型 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2018, 51(07): 613-619.

[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]. 郑州大学, 2019.