

实体有限元模拟预制节段桥墩循环荷载分析

张博强

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:采用实体有限单元法模拟无粘结预应力、普通箍筋约束预制拼装桥墩在循环荷载下的力学反应,得到其荷载位移滞回曲线。为了提高预制拼装桥墩的滞回性能,改进模型,使用贯穿节段接触面的普通纵向钢筋作为能量耗散装置增强耗能能力。改进后的模型残余变形小,滞回性能高。

关键词:实体有限单元法;无粘结预应力;普通箍筋约束预制拼装桥墩;能量耗散装置

中图分类号:U443.22 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2010)03-0048-05

0 引言

近年来,桥梁的预制施工技术得到了越来越多的应用。与传统的现场施工相比较,预制施工技术把大部分的工作转移到了预制厂内,摆脱了对工地现场环境的依赖,尤其是在城市桥梁的施工过程中,预制技术大大减轻了其对交通的影响,施工质量也得到了保证。

在桥梁预制施工技术中,预制桥墩可以显著加快桥梁的施工进度,所以在国内外得到了广泛应用,例如杭州湾大桥、东海大桥,国外的七里桥、阳光高速桥等。但由于缺乏预制桥墩地震反应的知识,这些桥梁都集中于地震烈度较低的地区。故本文主要对预制桥墩的抗震性能进行研究。

以往关于预制桥墩抗震的研究主要集中在混凝土节段桥墩外包其他材料以增强桥墩的滞回性能,比如有:美国加州大学贝克利分校的 Hewes 和 Priestley 对采用无粘接预应力筋连接的预制拼装节段混凝土桥墩进行了循环加载试验研究,其最底部的节段外包了钢管^[1];台湾交通大学的周中哲对 Hewes 的试验进行了改进,对预制节段桥墩的各节段都采用了钢管约束素混凝土的方式,并对一根试件附加了外部的耗能装置^[2]。美国斯坦福大学的 Billington 提出一种后张无粘结预应力预制节段拼装桥墩,节段间没有纵向普通钢筋,塑性铰区的节段采用延性纤维加劲的水泥复合材料(DFRCC)^[3]。

采用 ANSYS 实体有限元方法模拟普通箍筋约束混凝土节段桥墩的循环加载分析,并研究贯穿节段界面的纵向普通钢筋对预制节段桥墩滞回能力的影响。

1 试件原型

预模拟的预制节段桥墩的几何和物理数据如下:

预制节段桥墩包括一个基础、一个加载端和四个等高的预制普通箍筋约束的混凝土节段。墩柱采用环形截面,无粘结预应力钢束穿过节段中心的孔道,两端分别锚固在基础和加载端混凝土中。桥墩构造如图1所示。

采用 C30 混凝土,无约束混凝土圆柱体抗压强度取用美国 Caltrans 抗震设计规范推荐的公式^[4]。采用 HRB335 普通钢筋,屈服强度取 335 MPa,箍筋直径 14 mm,间距 0.1 m,纵筋直径 22 mm,沿圆周均匀布置 16 根纵筋。

预应力钢束用 1×7(七股)钢绞线,直径为 15.2 mm,抗拉强度标准值 1 860 MPa。桥墩发生侧向位移时,必然会拉长预应力钢束,使钢束拉应力增大,对节段桥墩产生“回拉力”的作用,促使节段桥墩复位。

收稿日期:2009-09-25

作者简介:张博强 男 1985 年出生 硕士研究生

为了保证预应力钢束的拉应力在循环加载过程中对节段桥墩有足够的“回拉力”,而又不超过其抗拉极限强度,经多次模拟确定施加的预应力为钢绞线极限抗拉强度的50%。

2 有限元模型

采用 ANSYS 中专门分析混凝土的 Solid65 单元模拟混凝土。有限元模型中包含二种不同材料特性的混凝土,其中加载端和基础种的混凝土假设为各向同性弹性材料,而节段墩柱中混凝土采用 Mander 的约束混凝土应力-应变曲线关系^[5]。节段混凝土采用 William-Warnke 五参数破坏准则,不考虑压碎,混凝土张开裂缝的剪力传递系数为0.5,闭合裂缝的剪力传递系数为0.95,采用多线性随动强化模型(KINH),为保证计算的收敛未考虑应力-应变曲线的下降段。

普通钢筋和预应力钢束都采用 Link8 模拟。普通钢筋采用双线性随动强化模型(BKIN),其应力-应变曲线采用理想的弹塑性模型,采用 Von Mises 屈服准则。预应力钢束假设为各向同性弹性材料。

在节段间的接缝采用接触单元 Target170 和 Conta173 模拟,接触面间的摩擦采用库伦摩擦模型,摩擦系数为0.2。定义法向接触刚度因子 FKN 为0.5,通过使用单元关键字 KETOPT(2)来指定增广的拉格朗日算法,其余采用默认设置即可。

基础底面节点和侧表面节点完全约束。加载端顶部施加1 000 kN的竖直轴向力,模拟桥梁上部结构的重力。采用降温法对无粘结预应力钢束施加预应力。

采用分离式的有限元模型,混凝土保护层较薄,在有限元模型中不予考虑,普通钢筋单元和节段混凝土单元外表面共用节点,不考虑二者间的滑移。为了简化模型,减少单元数量,箍筋和纵筋截面均取拟模拟钢筋截面的2倍,则模型中纵向钢筋为8根,箍筋间距为0.2 m。无粘结预应力钢束两端也采用共用节点的方式来模拟锚固,基础和加载端各嵌入0.4 m。

本模型采用变幅、等幅混合位移加载控制,对加载端侧向的最高节点施加 y 方向位移,每级做2次加载循环,位移幅值分别为0.05、0.1、0.15、0.2 m。有限元模型如图2所示。

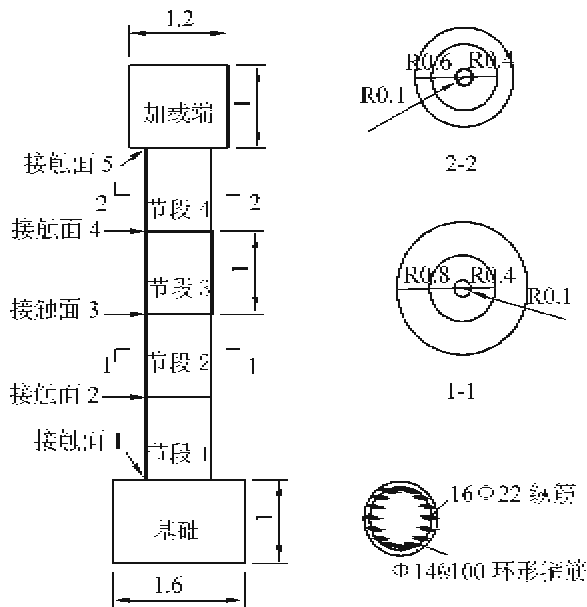


图1 节段桥墩构造(单位:m)

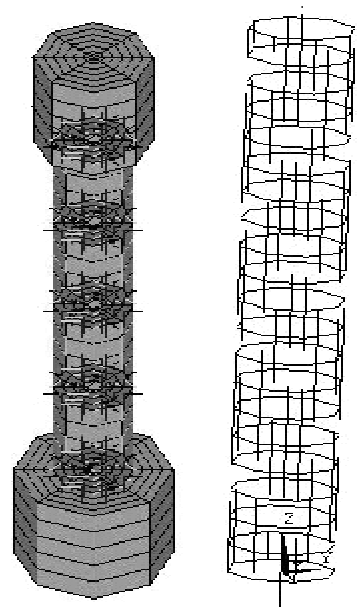


图2 有限元实体和钢筋网架

3 有限元分析结果

图3给出了有限元模型循环加载时,正反向不同的变形图,变形比例放大系数为3,从图中可以看出墩柱的变形主要是由于节段接缝的张开引起的,而且当正向加载到指定偏移量,然后再反向加载时,原来接缝张开区域闭合,原来闭合区域张开。当偏移量较小时,只有基础和节段1处的底层接缝张开;当偏移

量较大时,节段 1 和节段 2 间的接缝也张开了,但张开角度远小于底层接缝的张开角度。图 4 是上述有限元模型墩顶的荷载位移滞回曲线,其滞回环不够饱满,基本呈三折线型,但残余变形很小。

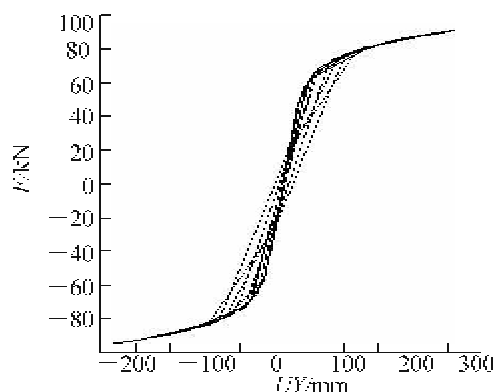


图 3 有限元模型加载变形

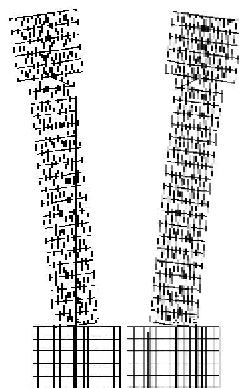


图 4 墩顶的荷载位移滞回曲线

4 模型改进

为了提高无粘结预应力节段桥墩的滞回耗能能力,对模型进行以下多项改进尝试:

(1) 设置 4 根穿过接触面 1 的粘结纵向普通钢筋 1.2 m, 作为耗能装置(以下简称耗能棒), 钢筋直径为 22 mm, 截面积 $A_1 = 380 \text{ mm}^2$, 在基础和节段 1 中各嵌入 0.6 m, 且在接触面 1 处留有一定的无粘结长度。

(2) 相比于(1) 耗能棒长度为 2.2 m, 穿过节段 1, 两端嵌入在节段 2 和基础中各 0.6 m。

(3) 相比于(2) 耗能棒长度为 3.2 m, 穿过节段 1、2, 两端嵌入在节段 3 和基础中各 0.6 m。

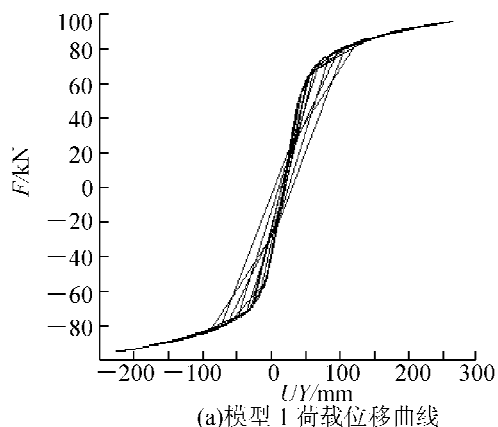
(4) 相比于(3) 设置 8 根耗能棒, 截面积为 $A_1/2 = 190 \text{ mm}^2$ 。

(5) 相比于(4) 设置 8 根耗能棒, 截面积为 $A_1 = 380 \text{ mm}^2$ 。

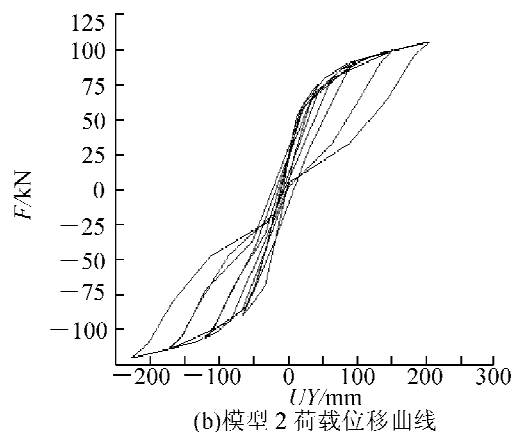
(6) 相比于(5) 耗能棒在接触面处不留有无粘结长度。

在上述有限元模型中模拟贯穿节段接触面的纵向普通钢筋(即耗能棒)时, 采用和混凝土外表面单元共用节点的方式来考虑粘结, 对于无粘结部分则不共用节点, 故无粘结长度为 0.4 m。

图 5(a) 和图 4 比较可见桥墩滞回性能没有明显改善, 只是侧向抗力增加; 图 5(a) 和图 5(b) 比较, 桥墩滞回性能和侧向抗力都显著增加; 图 5(b) 和图 5(c) 比较, 桥墩滞回性能有所增加, 但残余变形也变大了; 图 5(c) 和图 5(d) 比较, 滞回性能增加很小, 侧向抗力和残余变形几乎相同; 图 5(d) 和图 5(e) 比较, 滞回性能、侧向抗力以及残余变形增加幅度都比较大; 图 5(e) 和图 5(f) 比较, 滞回性能和残余变形几乎相同, 侧向抗力稍微增加。



(a) 模型 1 荷载位移曲线



(b) 模型 2 荷载位移曲线

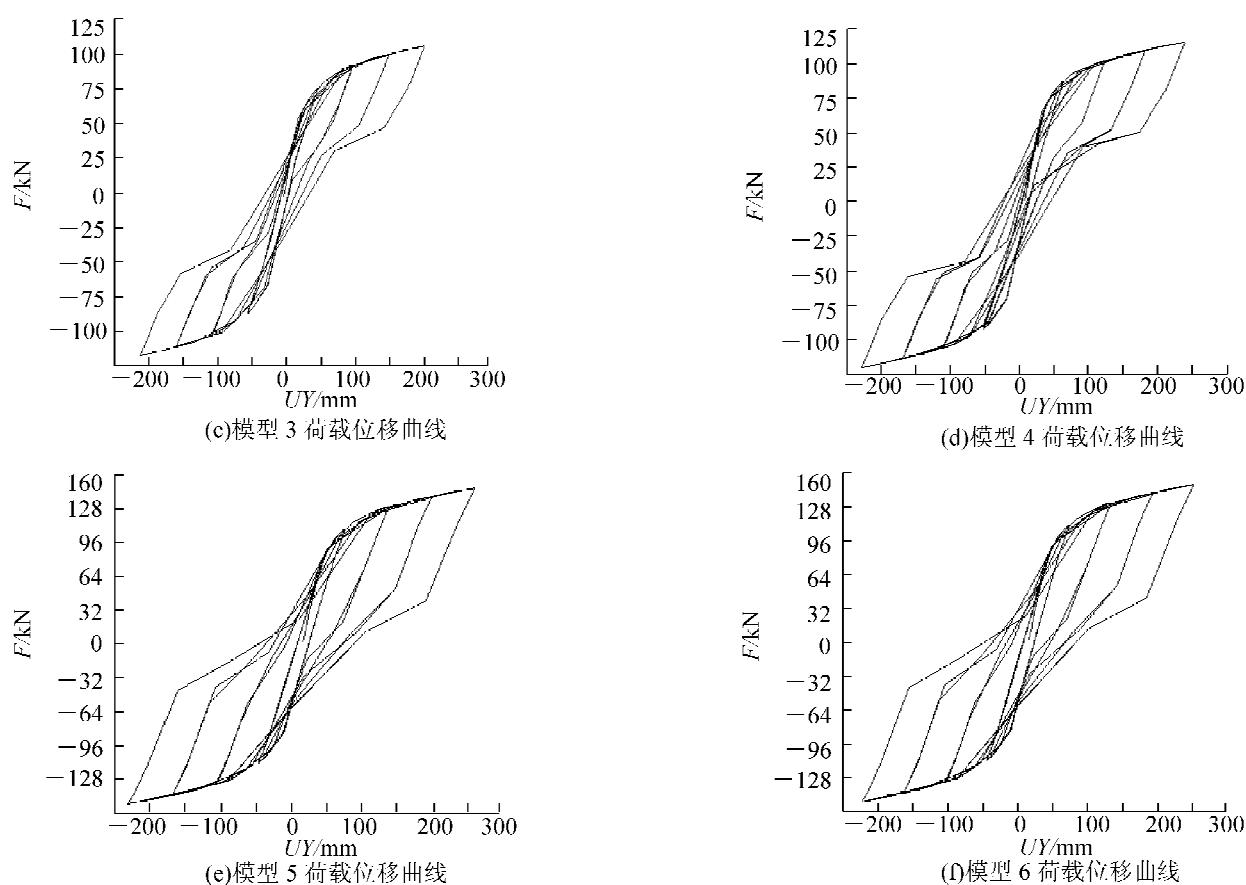


图5 各改进模型墩顶荷载位移滞回曲线

5 结语

采用 ANSYS 模拟预制节段拼装桥墩的循环荷载分析,与实际试验效果相差不大^[6]。为了提高其滞回耗能性能,设置了贯穿节段界面的普通纵向钢筋(即耗能棒),并比较了不同设置参数的滞回曲线,得出一些定性的结论:

耗能棒可以提高预制节段桥墩的滞回性能和侧向抗力;

耗能棒的纵向长度和配筋率越大,节段桥墩的滞回性能也越高,但残余变形也越大;

耗能棒配筋率一定,采用不同的横向布置方式对桥墩的滞回性能影响不大;

耗能棒在节段界面处,是否留有无粘结长度对桥墩的滞回性能影响不大。

参 考 文 献

- [1] Hewes J T. Seismic design and performance of precast concrete segmental bridge columns[D]. San Diego: University of California, 2002.
- [2] Chou ChungChe, Chen YuChih. Cyclic tests of post-tensioned precast CFT segmental bridge columns with unbonded strands[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006(35):159-175.
- [3] Billington S L, Yoon J K. Cyclic response of unbonded posttensioned precast columns with ductile fiber-reinforced concrete[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(4):353-363.
- [4] 叶爱君. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社, 2002.
- [5] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8):1804-1826.
- [6] 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]. 上海:同济大学土木工程学院, 2008.

Finite Element Simulations of Cyclic Loading Response of Precast Segmental Columns

Zhang Botao

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: This paper focuses on precast segmental unbonded posttensioned bridge columns with general transverse reinforcement. 3D finite element models are conducted to investigate the cyclic loading response behavior and force-displacement curves of this type columns. In order to improve the hysteretic performance of the precast segmental columns, the models are been modified. Longitudinal mild steel reinforcement crossing the column segment joints is added as an energy dissipation device to enhance the hysteretic energy dissipation capacity of the columns. The improved models show better hysteretic energy dissipation capacity, and less residual displacement.

Key words: 3D finite element model; unbonded posttension; general transverse reinforcement; precast segmental columns; energy dissipation device

~~~~~

(上接第 47 页)

[4] 张雄, 王天舒. 计算动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

[5] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.

[6] 周宏伟, Lwas MA. 粗糙表面分维计算的立方体覆盖法[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(6): 456-458.

[7] 温诗铸. 纳米摩擦学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.

## Numerical Simulation and Analysis of Discrete Element Method in Sliding Friction

Gao Xiukun<sup>1</sup>, Li Xingzhao<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** A simple outline of the present sliding friction is made, and the discrete method is introduced into the study to discuss the relation of sliding friction coefficient and some important factors, such as contact pressure, surface roughness and relative sliding velocity. Finally the results of numerical simulation are compared with the classical friction theory, and also some suggestions are proposed on further relative studies.

**Key words:** discrete method; friction coefficient; relative sliding velocity; contact pressure