

预制预应力混凝土装配整体式框架抗震性能研究*

蔡建国¹, 冯健¹, 王赞¹, 朱洪进²

- (1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;
2. 中国移动通信集团广东有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518038)

摘要: 在介绍一种预制预应力混凝土装配整体式框架结构体系的基本形式及其结构特点的基础上, 通过对三个不同键槽长度的预制混凝土框架中节点的低周反复荷载试验研究, 并利用面向对象的开放式计算程序 OpenSees 对一榀两跨三层框架结构进行静力弹塑性分析, 研究了这种框架结构体系的抗震性能。试验和理论分析结果表明: 框架中节点的滞回曲线丰满, 节点耗能能力较强; 框架结构的梁铰耗能机制提高了结构整体的耗能能力; 经过合理设计的预制框架结构体系具有良好的抗震能力, 完全能够满足抗震设防的要求。

关键词: 抗震性能; 预制结构; 装配整体式框架; 低周反复荷载试验; 静力弹塑性分析

中图分类号: TU375.4 TU317.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)02-0136-05

Seismic Behavior of Frame Comprised of Precast Prestressed Concrete Components

CAI Jianguo¹, FENG Jian¹, WANG Zan¹, ZHU Hongjin²

- (1. Key Laboratory of C & PC Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Guangdong Southern Planning & Designing Institute of Telecom Consultation Co., Ltd., Shenzhen 518038, China)

Abstract: The basic concept and characteristic of framed structure comprised of precast prestressed concrete components were firstly introduced, and the seismic behavior of joints of this system was investigated under low cyclic and reciprocal loading. The specimens were three joint members with different length of service hole. The pushover analysis of a two-span, three-floor frame structure was conducted by structural analysis software OpenSees to estimate the seismic performance. The experiment and analysis results indicate that the joints have full hysteretic loops and better energy dissipation capacity. And the energy dissipation mechanism with plastic hinges at beam ends increases the integral energy dissipation capacity. The seismic performance can satisfy the demand if they are well designed and constructed.

Key words: seismic performance; precast structure; prefabricated integral frame; cyclic loading test; pushover

近年来, 我国建筑行业提出了住宅产业化和建筑工业化的目标。而现阶段我国建筑行业大都使用现浇混凝土, 其生产效率低、环境污染重、经济浪费大。因此, 以规模化、工厂化生产建筑产品为目标, 通过技术集成与产品集成, 实现建筑过程的工

厂化, 变工地为工厂, 大幅度地提高劳动生产率是建筑工业化发展的必由之路。

国内外经过几十年的研究与推广, 目前预制及预制装配式结构的种类繁多^[1-3]。框架结构是住宅建筑中应用广泛的一种结构形式。但由于地震作用

* 收稿日期: 2008-08-01

基金项目: 江苏省建设系统科技招标资助项目

作者简介: 蔡建国(1984生), 男, 博士研究生; 通讯作者: 冯健; E-mail: fengjian@seu.edu.cn

等因素的影响,完全的预制框架结构事实上目前已经很少见,实用的范围被大大缩减。而作为整体性能介于纯预制与现浇之间的预制装配整体式结构的应用近几十年来极为广泛^[4-6]。

静力弹塑性分析方法是一种体现基于性能抗震设计思想的结构抗震能力评估方法。作为结构抗震性能评估一种有效的计算方法,静力弹塑性分析(Pushover分析)方法是一种近似方法,通过对结构模型施加按某种方式模拟地震水平惯性力作用的侧向力并逐渐单调增大,从而可以了解结构的耗能机制和薄弱环节等。近年来国内外学者对 pushover 分析的具体实现方式和工程应用进行了大量研究:如叶燎原等^[7]探讨了结构静力弹塑性分析的原理;尹华伟等^[8]以及杨博等^[9]对静力弹塑性分析方法提出了改进;种讯等^[10]以及孙巍巍^[11]等分别利用 Pushover 方法对钢筋混凝土结构以及预应力混凝土结构进行了全过程分析;Kalkan 等^[12]利用静力弹塑性方法对建筑物进行了抗震评估。

本文在介绍一种预制预应力混凝土装配整体式框架结构体系的形式及其特点的基础上,通过三个预制框架结构中节点的低周反复加载试验和对一榀三层两跨框架结构的弹塑性静力分析,研究了这种预制预应力混凝土装配整体式框架结构体系的抗震性能。

1 框架结构形式及其特点

世构体系(Scope)技术是南京大地集团公司从法国引进的一种预制预应力混凝土装配整体式框架结构体系,其预制构件包括预制混凝土柱、预制预应力混凝土叠合梁、板,属于采用了整浇节点的一次受力叠合框架。

世构体系是集工厂化生产、现场拼装于一体的框架式结构体系。世构体系一般在预制厂的生产线上根据设计图进行预制柱、预制预应力梁、板的生产,后将预制构件运至施工现场后进行拼装,然后在现场进行梁叠合层、梁端键槽以及节点的浇筑。有时世构体系的预制柱也可以改为现场浇筑混凝土柱。自从世构体系被引进以来,已经在住宅、大卖场等许多建筑中得到了应用^[13-14]。

世构体系的特殊性就在于它的节点构造方式,它的节点由键槽、U形钢筋和现浇混凝土三部分组成。世构体系预制预应力混凝土梁下部纵向钢筋(预应力钢绞线)在键槽即梁端的塑性铰区实现搭接连接。U形钢筋的制作及施工极为重要,它对于节点的抗震性能有很大的影响。由于世构体系节点

属于现场浇筑,所以它是一种强连接的框架结构体系。世构体系节点构造及预制梁端键槽如图1、2所示。

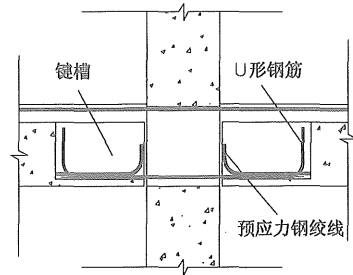


图1 节点构造示意图

Fig. 1 The sketch map of the joint

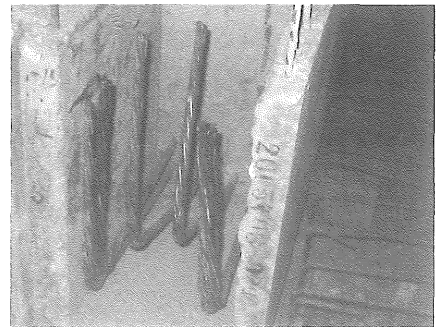


图2 预制梁端键槽图

Fig. 2 The service hole of precast beams

世构体系除了一般预制框架结构具有施工速度快、工期短、环境污染小、质量有保证以及经济性好的优点外,由于采用了先张预应力技术,减小了构件截面,节省了能源,建筑自重得到了减轻,降低了建筑成本;世构体系节点施工简单方便,且用钢量较低。

2 框架结构中节点试验研究

在东南大学结构实验室进行了三个世构体系中节点的低周反复加载试验。本试验的三个试件除了键槽的长度(即U形钢筋的长度)不相同外,其余配筋及构造情况均相同。为了直观表示构件的差异,根据键槽的长度将试件命名为:JC40、JC45、JC50。从垂直裂缝的出现和开展上来看,三个试件并无太大的差别,即开裂荷载与键槽中钢筋的搭接长度的关系不大。构件的屈服荷载以及在屈服前相同荷载级下的裂缝宽度均相差不大。节点核心区仅在2倍屈服位移时出现了交叉斜裂缝,后期没有发展。混凝土柱在整个试验过程中没有出现过大的裂缝。构件的破坏主要是梁端部混凝土被压碎,在键

槽区形成了塑性铰。根据试验得到的梁端荷载和位移数值,可以得到如图 3、4 所示试件的骨架曲线和滞回曲线。

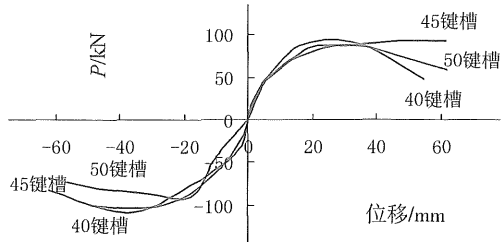


图 3 试件骨架曲线

Fig. 3 Skeleton curves of load-displacement at beam ends

通过试验可知:世构体系中节点的滞回曲线丰满,节点的耗能能力比较强;世构体系梁柱节点的主要破坏发生在梁端塑性铰区,破坏也是以弯曲破坏为主,柱子以及节点区没有出现严重的破坏情况。

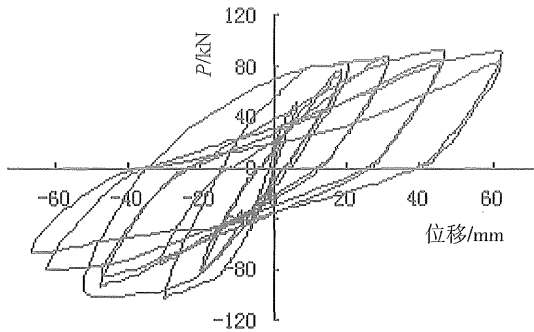


图 4 JC45 试件的滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic loops of load - displacement for JC45

3 框架结构抗震能力分析

为了全面了解世构体系整体框架结构的抗震性能,本文设计了一榀三层两跨的平面框架,并采用面向对象的开放式计算程序 OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) 对其进行了静力弹塑性 (pushover) 分析^[15]。

3.1 算例描述

本文分析算例为一榀二跨三层框架结构,底层层高 4.5 m,二、三层层高为 4 m。框架梁跨度为 8 m。混凝土强度等级在键槽部位为 C50,其余部分均为 C40。预应力筋采用 $\Phi^{12.7}$ 钢绞线,预应力筋强度标准值 $f_{ptk} = 1860 \text{ N/mm}^2$,预应力筋张拉控制应力 $\sigma_{con} = 0.75 f_{ptk} = 1395 \text{ N/mm}^2$ 。经计算,预应力损失值约为张拉控制应力的 20% 左右,

则有效预应力 σ_{pe} 取为 1120 N/mm^2 。普通钢筋采用 HRB335 级钢筋。分析算例的结构示意图以及梁、柱的截面和配筋情况如图 5 所示。

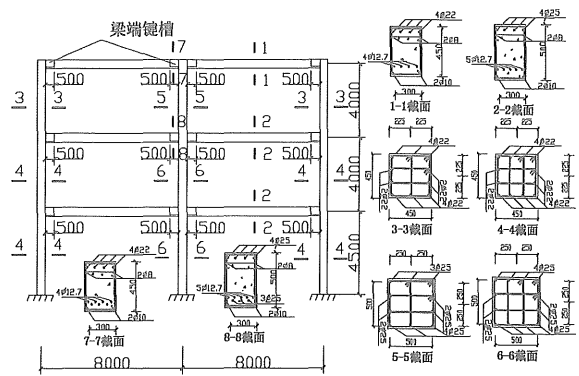


图 5 算例结构示意图

Fig. 5 Details of the example

3.2 计算模型的建立

为了简单有效的建立分析模型,本文采用了 OpenSees 中的纤维截面和带塑性铰的梁柱单元来模拟结构的不同组成部分:

(1) 纤维截面:纤维截面由具有简单且通用形状的片 (Patch) 组成,如四边形、圆形和三角形。另外截面可以通过层 (Layer) 指定截面的配筋情况。再根据精度要求将片细分为单个的纤维。箍筋的约束作用对截面核心区混凝土受压强度和极限应变的提高则通过定义不同的材料属性赋给纤维,材料属性的定义见 3.3 节。纤维截面可以在计算的过程中包含截面弯矩和轴向力的相互耦合作用。典型的纤维截面如图 6 所示。

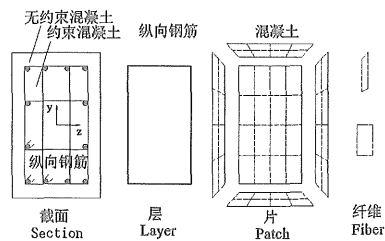


图 6 纤维截面划分示意图

Fig. 6 The drawing of the fiber section

(2) 含塑性铰的梁柱单元:该单元由单元两端的塑性铰区和中间的线弹性部分组成。单元的塑性集中发生在塑性铰区。塑性铰区使用自定义截面,本文中塑性铰区采用上面的纤维截面。对于框架梁,由于键槽部位比较薄弱,所以塑性铰区长度

取为键槽的长度；对于框架柱，取 $0.5 h_c$ ，其中 h_c 为弯矩作用方向柱的截面尺寸。

3.3 材料的本构关系

非预应力筋采用理想弹塑性的应力 - 应变关系模型，预应力筋采用东南大学长期测试总结的对数模型如图 7 所示^[11]。对于预应力筋，其应力 - 应变关系可表示为

$$\begin{cases} \sigma_s = E\varepsilon_s, \sigma_s < f_p \\ \sigma_s = f_{cu}(a + b \lg \varepsilon), \sigma_s > f_p \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中： $a = 1.254$ ， $b = 0.083$ ； f_p 为预应力筋的比例极限点， f_{cu} 为预应力筋的极限点。

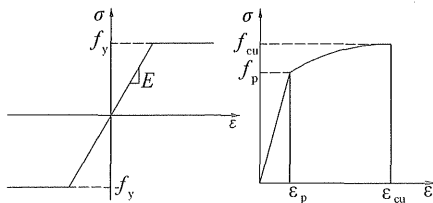


图 7 非预应力筋和预应力筋的应力 - 应变关系模型
Fig. 7 The stress and strain modal of steel bar and prestressed bar

混凝土的本构关系采用 Park 模型，如图 8 所示。在计算中采用了以下假定：截面应变符合平截面假定；混凝土不考虑受拉区的拉应力；不考虑构件剪切变形的影响；不考虑混凝土收缩、徐变的影响。

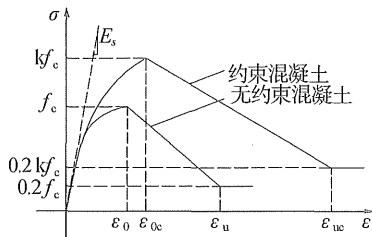


图 8 混凝土 Park 模型
Fig. 8 The Park modal of concrete

3.4 框架结构的静力弹塑性分析 (pushover)

由于本文主要研究预制预应力混凝土框架的抗震性能评估，层数较少，结构形状较规则，质量与刚度分布较均匀，所以忽略高阶振型的影响，采用倒三角分布的侧向荷载对结构进行推覆，并假定侧向力分布在整个加载过程中保持不变。

模型建立之后，先将竖向重力荷载施加在结构上，然后施加水平荷载对框架结构进行弹塑性静力 (pushover) 分析。加载过程采用位移控制，控制

节点为顶层的中柱顶节点，加载步长为 0.001 m ，分析直到顶点位移达到 0.25 m ，即楼层位移角为 0.02 时结束。分析得到结构的基底剪力 - 顶点位移关系曲线如图 9 所示。图中标出了柱端和梁端塑性铰出现的顺序和大致时刻。

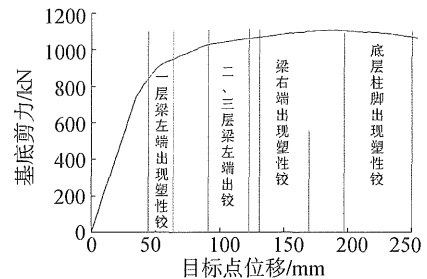


图 9 框架结构基底剪力 - 目标点位移关系曲线
Fig. 9 The relationship between base shear force and objective displacement

从图 9 可以看出，荷载较小时，结构基底剪力 - 目标点位移曲线呈线性关系；随着荷载的加大，结构的刚度出现明显的降低，基底剪力 - 目标点位移曲线逐渐变得平缓。刚度降低的原因主要由两部分因素导致：其一是梁柱混凝土出现裂缝，构件刚度降低；其二是两端出现塑性铰。随着梁端塑性铰的增加，钢筋不断屈服，结构刚度不断减小，结构基底剪力 - 目标点位移曲线变得更为平缓；但由于钢筋屈服后，截面仍可承受一定程度的弯矩增量，结构仍存在较小的正刚度，因此仍可继续增加水平力。但当底层框架柱出现塑性铰后，结构出现负刚度；力 - 位移曲线开始出现下降段。框架塑性铰出现位置和顺序如图 10 所示。

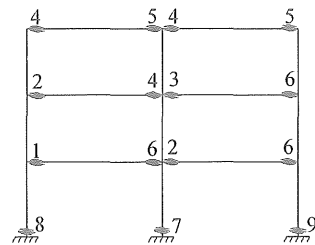


图 10 框架结构塑性铰出现顺序
Fig. 10 The sequence of the appearance of plastic hinges

采用等能量原理，近似得到结构在罕遇地震下的最大顶点位移为 0.105 m 。由图 8 可知，结构顶点位移达到目标位移时，只有梁端出现塑性铰，柱端未出铰，与设计目的相符合。此外，达到最大顶点位移时，梁端和柱端产生塑性转角均不大，梁端

采用加密箍筋的方法后完全能够满足转角延性的要求。由图9可知,本结构体系耗能方式为梁端耗能机制。可见,经过合理设计的预制预应力混凝土装配整体式框架结构,具有良好的抗震性能,能够满足抗震设防的要求。

4 结 语

本文对一种预制预应力混凝土装配整体式框架结构体系及其中节点的抗震性能进行了详细的理论和实验研究,可以得到如下结论:

(1) 梁柱中节点试件在低周反复荷载作用下,混凝土的开裂以及压碎主要集中于键槽部位,节点和混凝土柱在试验中均未发生破坏。

(2) 梁柱节点的滞回曲线丰满,节点耗能能力较为理想。

(3) 对预制预应力混凝土装配整体式框架结构的静力弹塑性分析验证了节点试验的结论,框架结构为理想的梁铰耗能机制。而框架结构的梁铰耗能机制,增加了整个结构体系的耗能能力。

(4) 经过合理设计的预制预应力混凝土装配整体式框架结构,具有良好的抗震性能,能够满足抗震设防的要求。

参考文献:

- [1] CHEOK G S, STONE W C, Kunnath S K. Seismic response of precast frame for seismic regions [J]. *ACI Structural Journal*, 1998, 95(5): 527-539.
- [2] MENG S P, CHONG X. Research on seismic performance of precast prestressed concrete frame [C]. *The International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering*. Nanjing, 2005.
- [3] 吕西林, 郭子雄, 王亚勇. RC 框架梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2001, 22(1): 2-7.
LU Xilin, GUO Zixiong, WANG Yayong. Experimental study on seismic behavior of beam-column subassemblies in RC frame [J]. *Journal of Building Structures*, 2001, 22(1): 2-7.
- [4] 胡庆昌. 建筑结构抗震设计与研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 144-157.
- [5] PAYLAY P, PARK R, PRIESTLEY M. Reinforced concrete beam-column joints under seismic actions [J]. *ACI Journal*, 1978(11/12): 255-278.
- [6] 朱洪进. 预制预应力混凝土装配整体式框架结构(结构体系)节点试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [7] 叶燎原, 潘文. 结构静力弹塑性分析(push-over)的原理和计算实例[J]. *建筑结构学报*, 2000, 21(1): 37-43.
YE Liaoyuan, PAN Wen. The principle of nonlinear static analysis and numerical examples [J]. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(1): 37-43.
- [8] 尹华伟, 汪梦甫, 周锡元. 结构静力弹塑性方法的研究与改进[J]. *工程力学*, 2003, 20(4): 45-49.
YIN Huawei, WANG Menxi, ZHOU Xiyuan. Study and improvement on structural static pushover analysis method [J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(4): 45-49.
- [9] 杨溥, 李英民, 王亚勇, 等. 结构静力弹塑性分析(push-over)方法的改进[J]. *建筑结构学报*, 2000, 21(1): 44-50.
YANG Pu, LI Yingmin, WANG Yayong, et al. A study on improvement push-over analysis [J]. *Journal of Building Structure*, 2000, 21(1): 44-50.
- [10] 种迅, 孟少平. 钢筋混凝土框架结构全过程 pushover 分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2005, 25(1): 38-42.
CHONG Xun, MENG Shaoping. Complete pushover analysis of RC frame structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2005, 25(1): 38-42.
- [11] 孙巍巍, 孟少平, 吴京. 多跨超长预应力混凝土框架结构抗震能力研究[J]. *工业建筑*, 2006, 36(5): 23-26.
SUN Weiwei, MENG Shaoping, WU Jing. Research on the seismic capability of prestressed concrete frame structures with large longitude length [J]. *Industrial Construction*, 2006, 36(5): 23-26.
- [12] EROL K, SASHI K K. Assessment of current nonlinear static procedures for seismic evaluation of buildings [J]. *Engineering structures*, 2007, 29: 305-316.
- [13] 周文军. 预制预应力混凝土装配整体式房屋结构的应用[J]. *彭城职业大学学报*, 2004, 19(2): 6-8.
ZHOU Wenjun. Application of ready-made pre-strength concrete fitting in integral building framework [J]. *Journal of Pengcheng Vocational University*, 2004, 19(2): 6-8.
- [14] 刘亚非, 庞涛, 顾西平. 预制预应力混凝土装配整体式房屋结构的施工实践[J]. *江苏建筑*, 2002, 3: 10-14.
LIU Yafei, PANG Tao, GU Xiping. Construction Practice of fabricated precast prestressed integral concrete building structure [J]. *Jiangsu Construction*, 2002, 3: 10-14.
- [15] SILVIA M, FRANK M, GREGORY L F. Introduction to opensees [M]. Berkeley: University of California, 2006.